

Aus der Klinik für Allgemeine, Unfall- und  
Wiederherstellungschirurgie  
Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. W. Böcker

**Valgisierende kniegelenksnahe Umstellungsosteotomie -  
radiologische und klinische Ergebnisse**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Sven Patzler

aus  
Borna

2020

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Priv. Doz. Dr. med. W.C. Prall

Mitberichterstatter: Priv. Doz. Dr. med. S. Grote

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. J. Fürmetz

Dekan: Prof. Dr. med. dent. R. Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 05.03.2020

Für meine Eltern und meine Schwester

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Das Kniegelenk.....	2
1.2	Achsfehlstellungen und deren Auswirkungen.....	2
1.2.1	Ursachen.....	2
1.2.2	Genu varum oder Genu valgum .....	3
1.2.3	Folgen .....	4
1.2.4	Therapie eines Genu varums.....	6
1.3	Valgisierende kniegelenksnahe Umstellungsosteotomien.....	6
1.3.1	Geschichte .....	6
1.3.2	Zielsetzung der oHTO und cDFO.....	8
1.3.3	Präoperative Planung.....	9
1.3.4	Operationstechniken .....	9
1.4	Zielstellung.....	12
<b>2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>14</b>
2.1	Ein- und Ausschlusskriterien .....	14
2.2	Patientenkollektiv .....	14
2.3	Behandlungsregime bei Varusdeformitäten.....	15
2.3.1	Präoperative Planung nach der EPF-Methode.....	15
2.3.2	Operationstechnik .....	23
2.3.3	Verwendete Implantate .....	25
2.3.4	Intraoperative Achskontrolle via Planfeldmethode .....	26
2.3.5	Nachbehandlung .....	27
2.4	Datenerhebung und -analyse.....	28
2.4.1	Datenerhebung .....	28
2.4.2	Auswertung des OP-Berichtes .....	29
2.4.3	Klinischer Verlauf und Komplikationen.....	29
2.4.4	Radiologische Auswertung.....	29
2.4.5	Planfeldmethode .....	31
2.4.6	Klinische Scores.....	32
2.5	Statistische Auswertung.....	33
<b>3</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>34</b>
3.1	Auswertung des OP-Berichtes .....	34
3.2	Klinischer Verlauf und Komplikationen.....	35
3.3	Radiologische Auswertung.....	36

3.3.1	MAD und HKA.....	37
3.3.2	Mechanische Beinachse .....	38
3.3.3	MPTW und mLDFW .....	39
3.3.4	JLCA .....	42
3.3.5	$\alpha$ -Winkel.....	42
3.3.6	Tibial Slope und aPDFW.....	42
3.3.7	Patellaposition.....	42
<b>3.4</b>	<b>Panfelmethode.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5</b>	<b>Klinische Scores.....</b>	<b>45</b>
3.5.1	SF-36 .....	45
3.5.2	Lysholm-Score .....	45
3.5.3	VAS.....	46
<b>4</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>49</b>
4.1	Lokalisierung der Deformität.....	49
4.2	Wahl des optimalen Zielbereiches .....	50
4.3	Differenzen zwischen beiden Gruppen.....	51
4.4	Komplikationen.....	55
4.5	Unbeabsichtigte Veränderungen.....	56
4.6	Klinische Ergebnisse .....	57
4.7	Vergleich zum Kniegelenkersatz.....	60
4.8	Limitationen der Studie.....	61
4.9	Ausblick.....	62
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>84</b>
7.1	Abbildungsverzeichnis .....	84
7.2	Tabellenverzeichnis.....	84
7.3	Abkürzungsverzeichnis .....	85
<b>8</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>88</b>

### 1 Einleitung

Heutzutage sehen sich immer jüngere Menschen auf Grund des eigenen hohen Aktivitätsniveaus mit einer medialen unikompartimentellen Kniegelenksarthrose konfrontiert [1]. Aktuell liegt die Prävalenz für eine symptomatische Kniegelenksarthrose bei den über 45-Jährigen zwischen 7% und 17% und steigt bei den über 75-Jährigen auf 33% [2]. Ein unikondylärer oder vollständiger Gelenkersatz zeigt gute Ergebnisse bei wenig aktiven aber eine höhere Revisionsrate bei sehr aktiven Patienten [3]. Deshalb ist vor allem beim jüngeren Patientenkollektiv mit einer medialen Gonarthrose bei varischer Fehlstellung die Umstellungsosteotomie zur Achskorrektur eine sinnvolle Behandlungsoption. Durch eine Achskorrektur verlagert sich die Belastung mehr in Richtung des Kniegelenkszentrums oder des intakten lateralen Kompartimentes und es kommt zu einer Entlastung des medialen Kompartimentes mit beschriebener Minimierung der subchondralen Sklerose und erhöhter Knorpelregeneration [4,5]. Der Eingriff kann auch als Präventivmaßnahme zur Vorbeugung einer frühzeitigen medialen Kniegelenksarthrose eingesetzt werden [6–8]. Das postoperative Aktivitätsniveau nach einer Achskorrektur ist vergleichbar zu dem einer Endoprothese und ein Gelenkersatz kann letztlich hinausgezögert oder gar verhindert werden [9–11].

Bei der präoperativen Planung einer Umstellungsosteotomie müssen mehrere Dinge beachtet werden. Der Schwerpunkt der Deformität und das Ausmaß der notwendigen Achskorrektur werden so gewählt, dass letztlich möglichst normwertige anatomische Verhältnisse mit horizontaler Kniegelenksebene zu erreichen. Eine Überkorrektur an der Tibia führt bei femoral bedingter Deformität trotz korrekter postoperativer mechanischer Beinachse zu einer Schrägstellung der Kniegelenksebene [12]. Damit kann der Knorpel seiner eigentlichen Funktion als Gelenkpuffer nicht mehr optimal nachkommen und erfährt durch die vermehrten Scherkräfte eine schneller fortschreitende Gelenkdestruktion [13]. Weitere Parameter wie die erwartete Knochenheilung oder eine vorhandene Beinlängendiskrepanz beeinflussen zusätzlich die Wahl zwischen einer Korrekturosteotomie mit öffnendem oder mit schließendem Keil.

In dieser Arbeit wird erstmalig ein Vergleich zwischen zwei valgusierenden Osteotomien, der medial aufklappenden (open-wedge) hohen tibialen

Osteotomie (oHTO) und der lateral zuklappenden (closed-wedge) distalen Femurosteotomie (cDFO), vorgenommen. Die detaillierten Ergebnisse zum radiologischen und klinischen Outcome beider Verfahren werden dargestellt und erweitern vor allem die wenigen publizierten Studien zur cDFO.

### **1.1 Das Kniegelenk**

Das Kniegelenk ist das größte Gelenk des menschlichen Körpers. Funktionell stellt es ein Drehscharniergelenk (Trochoginglymus) dar, welches Beuge- und Streckbewegungen sowie bei gebeugtem Knie Rotationsbewegungen ausführen kann [14]. Als zentrales Gelenk der unteren Extremität besitzt es als Bindeglied zwischen Femur und Tibia den größten Hebelarm [15]. Mit dem 0,5 bis 7,7-fachen des Körpergewichtes sind die einwirkenden Kräfte bereits bei normalen Alltagstätigkeiten wie Gehen, Laufen oder Treppensteigen dementsprechend groß.[16,17]. Bei sportlichen Aktivitäten wie z.B. Springen können dagegen Belastungsspitzen vom 10 bis 16-fachen des Körpergewichtes auftreten [18–20]. Um den verschiedenen Anforderungsprofilen der Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfreiheit, Stabilität und Stützfunktion gerecht zu werden, ist ein komplexes Zusammenspiel zwischen Menisken, Bandapparat und Muskulatur von Nöten [21]. Für die Stabilisierung des Kniegelenkes reichen die passiven Elemente nicht aus [22]. Erst im Zusammenspiel mit der aktiven Muskulatur kann ein stabiles und vollumfängliches Bewegungsausmaß garantiert werden. Dem Musculus quadrizeps femoris kommt hierbei die größte Bedeutung zugute, da eine Quadrizepsatrophie eine Instabilität sowohl in Flexion als auch in Extension zur Folge hat [21].

### **1.2 Achsfehlstellungen und deren Auswirkungen**

#### **1.2.1 Ursachen**

Von einer Achsfehlstellung der unteren Extremitäten spricht man bei Abweichung von der physiologischen Beingeometrie. Die am häufigsten vorkommenden Deformitäten sind das Genu varum und valgum [23]. Als Ursache können verschiedene Erkrankungen in Frage kommen [24]. Wobei das Wachstumsalter einen wesentlichen Zeitraum für die Entstehung eines Genu varums darstellt. Zum Beispiel wurde kürzlich in einer Metaanalyse der Einfluss von

leistungsorientiertem intensivem Fußballtraining auf die Ausprägung einer Varusfehlstellung beschrieben [25]. Weitere Ursachen im Kindesalter sind vor allem ein Morbus Blount oder systemische Erkrankungen wie z.B. Achondroplasie, Rachitis und die renale Osteopathie. Eine valgische Deformität wird durch andere Erkrankungen wie z.B. dem Ellis-van-Creveld- und Marfan-Syndrom, dem Morbus Morquio und der enchondralen Dysostose, sowie durch Fehlstellungen der angrenzenden Gelenke bei Hüftluxation und Kontrakturen oder einem Knick-Platt-Fuß hervorgerufen. Als weiterer erheblicher Risikofaktor für ein Genu valgum gelten nach der aktuellen Studie von Shohat et al. ein Übergewicht, vorrangig bei jungen Frauen [26]. Varus- und Valgusdeformitäten treten auch bei entzündlichen Erkrankungen oder frühzeitigem Epiphysenschluss auf [27]. Als Ursache bei Erwachsenen kommen vorwiegend Frakturen oder degenerative Knorpelschäden mit Höhenminderung des Gelenkspaltes in Betracht [23]. Knorpelschäden werden durch indirekte Traumata mit Knick- und Drehbewegungen des Bandapparates und der Menisken bei sportlichen Aktivitäten hervorgerufen. In der Folge führt dies zu einer Bandlaxität und einer weiteren Destruktion der Menisken sowie des Knorpels bis hin zur Gonarthrose [15,28]. Weitere sekundäre Deviationen der Traglinie können z.B. nach Knochennekrose, Knochentumor oder rheumatoider Arthritis auftreten [23].

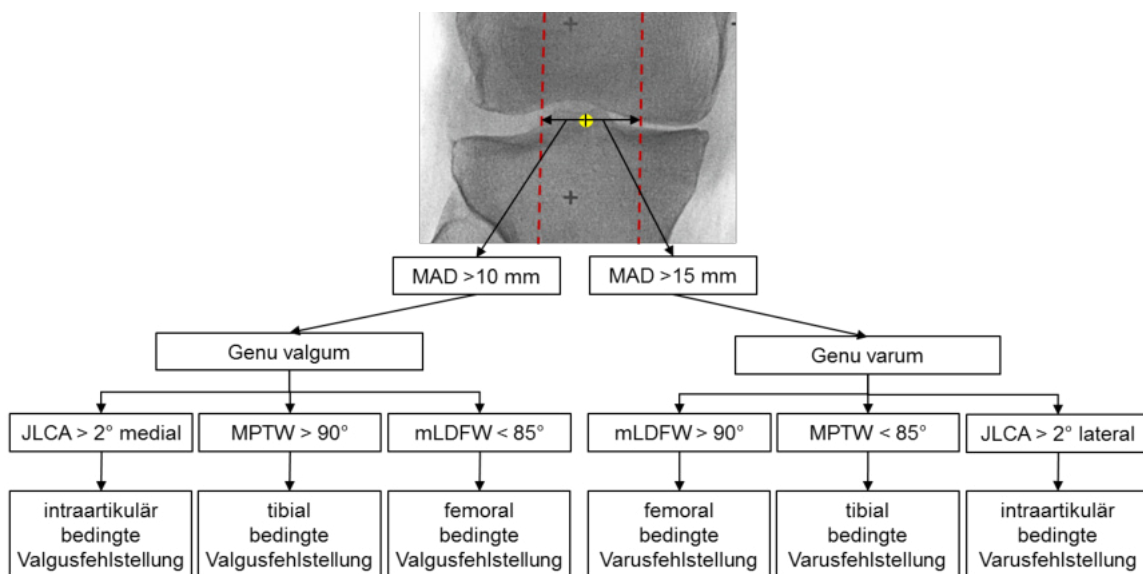
### **1.2.2 Genu varum oder Genu valgum**

Zur Feststellung eines Genu varums oder valgums müssen eine klinische Untersuchung und eine radiologische Analyse der Bein geometrie in der Frontalebene erfolgen. Hierbei sollten das Ausmaß und der Ort der Deformität bestimmt werden.

Für die Quantifizierung der varischen oder valgischen Achsabweichung kann der hip-knee ankle angle (HKA, mechanischer tibiofemorale Winkel (mTFW)) oder die mechanische Beinachse (Mikulicz-Linie, weight-bearing line) herangezogen werden. Bei physiologischer Beinstellung ist der HKA leicht varisch mit durchschnittlich  $-1,2^\circ$  (Standardabweichung (SD)  $\pm 2,2^\circ$ ) und die Abweichung der Beinachse („mechanical axis deviation“ (MAD)) in einem Bereich von 1 mm lateral bis 15 mm medial des Kniegelenkszentrums [29,30]. Der HKA zeigt negative Werte für ein varisches und positive Werte für ein valgisches Knie. Liegt die mechanische Beinachse mit einer mechanical axis deviation (MAD)  $> 15$  mm



medial des Kniegelenkszentrums, so spricht dies für ein signifikantes Genu varum. Im Gegensatz dazu weist ein Genu valgum eine laterale MAD > 10 mm auf [23,31]. Falls eine pathologische Achsabweichung festgestellt wurde, wird mit dem sog. Malalignment-Tests nach Paley und Tetsworth der Ort der Deformität lokalisiert [31]. Valgusfehlstellungen entstehen häufiger durch eine Deformität des Femurs mit einem verminderten mechanischen lateralen distalen Femurwinkel (mLDFW) und umgekehrt führt oft eine Tibiadeformität mit vermindertem medialen proximalen Tibiawinkel (MPTW) zur Varusfehlstellung [29,31–33]. Dies ist jedoch kein Regelfall und muss für jeden Patienten individuell bestimmt werden. Im Gegensatz zur MAD oder dem HKA wird der Gelenkwinkel nicht von Bandinstabilitäten oder Gelenkkollaps beeinflusst. Deshalb wird dieser immer mit in die Analyse mit einbezogen. Nicht immer liegt jedoch eine knöcherne Deformität vor. Die Minderung des medialen oder lateralen Gelenkspaltes auf Grund von intraartikulärem Knorpelverschleiß und eine relevante Bandlaxizität führen ebenfalls zu Achsabweichungen. Dies führt zu einer Änderung der sonst parallelen Kniebasislinien und wird mittels des Konvergenzwinkels der Kniegelenklinien (joint line convergence angle, JLCA) quantifiziert [34].

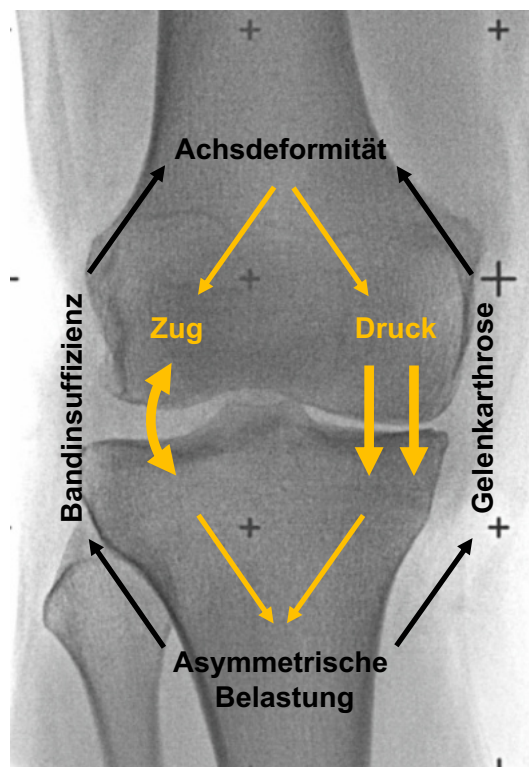


**Abbildung 1: Klassifikation der Achsabweichung [34]**

### 1.2.3 Folgen

Im physiologischen Knie liegt eine relative mediale zu laterale Druckverteilung im Verhältnis von 3:1 vor [35,36]. Biomechanische Studien zeigen, dass sich die

Druckbelastung im betroffenen Gelenkkompartiment mit Zunahme der Achsabweichung erhöht [35,37]. Zudem korreliert die Überbelastung direkt mit dem Verschleiß des Gelenkknorpels [38]. Bei einer varischen Achsabweichung kommt es zu einer vermehrten exzentrischen Belastung des Knies mit erhöhter Druckbelastung und Biegespannung. Dabei erhöht sich der Druck auf das mediale Kompartiment und führt zu einer Destruktion der Knorpelfläche. Zugleich steigt durch die Biegespannung lateral die Zugspannung auf das Außenband. Dadurch entstehen mit der Zeit eine Höhenminderung des medialen Gelenkknorpels und eine laterale Bandlaxität, die zu einer weiteren Achsabweichung und letztlich zur Knieinstabilität führen. Somit kann eine primäre Achsfehlstellung einen Circulus vitiosus mit Knorpeldefekt, Bandinsuffizienz und fortschreitender Achsabweichung mit progredienter Arthrose bedingen (Abbildung 2) [39].



**Abbildung 2: Circulus vitiosus bei Genu varum [39]**

Bis heute gelten demnach in der Literatur in Bezug auf eine sich entwickelnde Gonarthrose die progressive Wirkung einer varischen oder valgischen Achsabweichung als gesichert. Nach Cerejo et al. beschleunigt eine Varusdeviation die mediale Gonarthrose um das 4-fache und eine Valgusdeviation eine laterale Gonarthrose um das 5-fache [40]. Der Einfluss auf

die Inzidenz ist aus biomechanischer Sicht naheliegend, konnte aber in der Vergangenheit noch nicht ausreichend belegt werden [40–43]. Neuere Studien widerlegen diese Annahme teilweise und weisen zumindest für die varische Deformität einen Zusammenhang zwischen Inzidenz und medialer Gonarthrose auf [6–8].

In einer amerikanischen Studie berichten 80% der Patienten, die von einer Gonarthrose betroffen sind, von einem eingeschränkten Bewegungsumfang, 20% sind nicht mehr in der Lage wichtige Aktivitäten des täglichen Lebens zu erfüllen und 11% aller Betroffenen benötigen eine persönliche Betreuung [44]. Eine weitere Studie untersuchte den Zusammenhang zwischen dem radiologischen Nachweis einer zweit- bis viertgradigen Gonarthrose und den damit einhergehenden Knieschmerzen. Dabei korrelierte der Knieschmerz nur in 15% der Fälle mit dem Ausmaß der radiologischen Arthroseklassifikation [45].

### **1.2.4 Therapie eines Genu varums**

Die kniegelenksnahen Umstellungsosteotomien gehören zu den gelenkerhaltenden Eingriffen und stellen eine Methode zur Durchbrechung des obigen Circulus vitiosus bei Achsfehlstellungen dar [39]. Hierbei werden in der vorgelegten Studie die oHTO und die cDFO mittels Plattenosteosynthese voneinander unterschieden. Beide Verfahren dienen der Korrektur einer Varusfehlstellung und werden, je nachdem wo der Schwerpunkt der Fehlstellung liegt, angewendet. Wesentliche Ziele einer Achsumstellung sind die Druckentlastung des stärker belasteten Gelenkkompartimentes [46] mit deutlicher Beschwerdeverbesserung, die weitgehende Erhaltung der Kniekinematik sowie die Hinauszögerung einer Endoprothese [47–50].

## **1.3 Valgisierende kniegelenksnahe Umstellungsosteotomien**

### **1.3.1 Geschichte**

Das Konzept der Deformitätenkorrektur ist seit der Zeit des Hippokrates mit dem hippokratischen Scamnum, einer Zugvorrichtung zur Begradigung der Knochen, bekannt [51]. Jedoch gewann die Osteotomie, die zuvor durch häufige Infektionen lebensgefährlich war, erst mit einer guten Antisepsis und verbesserten Operationstechnik am Ende des 19. Jahrhunderts an Akzeptanz in

ganz Europa [52]. Mit der Akzeptanz in der Bevölkerung zog auch die hohe tibiale Umstellungsosteotomie (HTO) bei einer valgus- bzw. varus-bedingten Gonarthrose, die im Vergleich zu heute mit einer subtuberositären Osteotomie durchgeführt wurde, als alternative Therapie ein [53]. Brittain hingegen verfolgte bei der Korrektur eines Genu valgum einen anderen Ansatz, indem er nicht die Tibia sondern den distalen Femur lateral aufklappend osteotomierte. Den Vorteil gegenüber der HTO sah er in der geringeren Gefäßkomplikation [54]. Wardle widerlegte mit seiner Studie im Jahre 1964 Brittain's Aussage, indem er postoperativ eine Normalisierung des venösen Blutflusses feststellte [55]. Mit der klassischen lateralen closed-wedge HTO nach Coventry [56] etablierten sich die kniegelenksnahen Osteotomien ab den 50- und 60er Jahren zur Behandlung der medialen Gonarthrose. Die Stabilisierung der Osteotomien erfolgte meist durch eine postoperative Gipsruhigstellung und wurde teilweise mit Knochenklammern verstärkt [57]. Eine stabilere Osteotomiefixierung kam Anfang der 70er Jahre mit Einführung der T-Platte für die HTO sowie der 95°-Kondylenklingenplatte für die DFO zur Anwendung [58,59]. Durch die neuen stabilisierenden Techniken konnte der Heilungsverlauf beschleunigt werden. Damit gelang eine schnellere Mobilisierung der Patienten, die wiederum zu einem geringeren Muskelatrophie- und Thromboserisiko führten [60]. Während dieser Zeit verbesserten nicht nur die weiterentwickelten Plattensysteme das Ergebnis der Osteotomien, sondern auch neue innovative präoperative Planungsmethoden. Dabei vereinfachte die Röntgenganzbeinstandaufnahme (Lange Aufnahme im Stehen, LAiS) die Bewertung und Planung der Fehlstellungen [61]. Als postoperativer Zielpunkt wurde häufig der sog. Fujisawa-Punkt vorgesehen [62]. Die Arbeiten von Coventry, Miniaci et al., Dugdale et al. über Paleys CORA-Konzept (Center of Rotation of Angulation) bis hin zu computerunterstützten Anwendungen revolutionierten die präoperativen Planungen [63–67]. Anfang des 21. Jahrhunderts erfuhren die kniegelenksnahen Osteotomien einen weiteren Entwicklungssprung in Form von winkelstabilen Platten. Diese sorgten für eine stabilere Fixierung der Osteotomie bei gleichzeitigem Wegfall der als problematisch betrachteten Knochentransplantate [68]. Damit konnten die HTO und DFO, die zunehmend seit den 70er Jahren durch die voranschreitende Kniegelenksprothesenentwicklung als Primärtherapie bei Gonarthrose abgelöst wurden, seit den 2000er Jahren auf Grund eines gesteigerten

Gesundheitsbewusstseins und Aktivitätslevels seitens der Patienten neue Popularität erlangen [69].

### 1.3.2 Zielsetzung der oHTO und cDFO

Für ein gutes postoperatives klinisches Ergebnis bedarf es einer präzisen Korrektur der Beinachse auf Grundlage eines präoperativen Planungsmodells. Zur Planung des idealen Korrekturziels wird die anatomische oder mechanische Beinachse herangezogen [70]. Aktuell gibt es keine Einigkeit über ein bestimmtes Korrekturziel. Grundsätzlich sollte die Valgisierung der mechanischen Beinachse innerhalb der normwertigen anatomischen Achsverhältnisse und Gelenkwinkel liegen. Das Korrekturziel variiert jedoch je nach Autor zwischen neutraler ( $0^\circ$ ) und überkorrigierter Beinachse ( $8^\circ$ ) [13]. Während van der Woude et al. eine neutrale mechanische Beinachse heranziehen, befürwortet Coventry die anatomische Beinachse mit einem postoperativen Valguswinkel von mindestens  $8^\circ$  als Zielgröße [63,71]. Hernigou et al. empfehlen dagegen die Verwendung der mechanischen Beinachse zur postoperativen Beurteilung mit einem Valguswinkel zwischen  $3^\circ$  und  $6^\circ$  [47]. Nach Pape et al. wird die Position der mechanischen Beinachse in Relation zur gesamten Tibiaplateaubreite (0-100%, medial 0% und lateral 100%) als präzisester Parameter angesehen. Die meistbeachtete Arbeit lieferten hierzu Fujisawa et al. im Jahre 1979, welche die abheilende Knorpelulzeration bei einer postoperativen Traglinie innerhalb des lateralen Plateaus von 30-40% in Relation zum Kniegelenkszentrum beobachteten [62]. Darauf basierend postulierten Miniaci et al. eine postoperative mechanische Beinachse zwischen 60-70% der gesamten Tibiaplateaubreite als ideal [64]. Dugdale et al. konkretisierten den Zielbereich durch Modifizierung der Fujisawa-Kriterien auf mindestens 50-75% und bestenfalls 62-66% [65]. Die von Noyes et al. bezeichnete 62%-Koordinate wird in Fachkreisen als „Fujisawa-Punkt“ bezeichnet (vgl. Abbildung 12) [72]. In der neueren Literatur wird von dem Standpunkt eines zentralen Korrekturpunktes oder -bereiches abgerückt. Die Planungsmethoden, abgestimmt auf die mediale Knorpeldicke, zielen auf individuell angepasste Korrekturen unter Vermeidung von Überkorrekturen. Zu Beginn des Eingriffes wird deswegen standardmäßig eine Arthroskopie des Kniegelenks durchgeführt. Empfohlen wird je nach Ausmaß der medialen

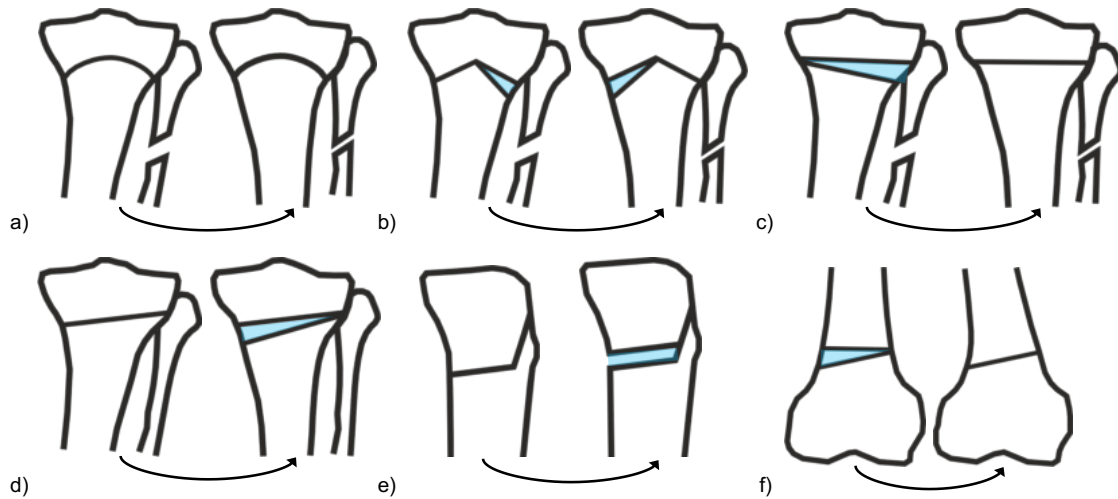
Chondromalazie ein moderater Zielbereich von valgischen  $1,7^{\circ}$ - $5^{\circ}$  oder 50%-65% der gesamten Tibiaplateaubreite [73,74].

### **1.3.3 Präoperative Planung**

Die Planung der Achskorrektur kann konventionell mit der Erstellung aufwendiger Zeichnungen oder anhand digitalisierter Ganzbeinstandaufnahme durch eine spezielle computerunterstützte Software erfolgen. Bei der konventionellen Planung werden entsprechend der biometrischen Parameter auf der Abpause der Knochenumrisse oder des Röntgenbildes der Deformitätsort, die Osteomieart sowie die Osteotomiehöhe eingezeichnet. Aktuell existiert noch kein einheitliches, standardisiertes Planungsverfahren, so dass die Berechnung des angestrebten Korrekturwinkels und der Knochenbasishöhe durch eine der Methoden nach Miniaci et al., Pape et al., Noyes et al. oder Coventry erfolgen kann [63–65,70]. Computerunterstützte Planungsprogramme wie z.B. mediCAD (Firma HECTEC) ermöglichen eine schnellere Analyse und präoperative Planung bei gewissen Standardeingriffen. Bei komplexeren Deformitäten können diese jedoch nur begrenzt Anwendung finden [66]. In der vorliegenden Studie wird eine von der Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie (Klinik für Allgemeine-, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie des Klinikums der Universität München) eigens entwickelte Endpoint-First (EPF)-Methode angewandt. Der Vorteil im Vergleich zu den vorher genannten Planungsmethoden ist der Wegfall der trigonometrischen Berechnungen der Keilmaße und Osteotomiehöhe, da diese durch die einfache grafische Darstellung direkt gemessen werden können (siehe 2.3.1). Intraoperativ wurde die Achskontrolle mit der Planfeldmethode überprüft (siehe 2.3.4).

### **1.3.4 Operationstechniken**

Die wesentlichen Verfahren zur valgisierenden Osteotomie an der proximalen Tibia und am distalen Femur werden in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 3: Schematische Darstellung der chirurgischen Behandlungsoptionen**

a) Dom-Osteotomie, b) Pendelosteotomie, c) laterale closed-wedge HTO, d) mediale open-wedge HTO, e) sagittale Ansicht open-wedge HTO, f) laterale closed-wedge DFO [13]

Die Dom- und Pendelosteotomie an der Tibia findet heutzutage kaum mehr Anwendung [13]. Die Dom-Osteotomie erfolgt auf Höhe der Fehlstellung über eine halbkreisförmige Bohrlochosteotomie um die Tuberositas tibiae. Anschließend wird die Fibula osteotomiert, um dessen Sperrwirkung für die Pendelbewegung der distalen Tibia zum geplanten Korrekturziel freizugeben [75]. Dem hohen Maß an flexibler, längenneutraler Korrektur und der breiten Knochenkontaktfläche steht eine anspruchsvolle Osteotomietechnik oftmals mit einem Doppelzugang und zusätzlicher Fibulaosteotomie, sowie die Gefahr einer Knochennekrose entgegen [76,77].

Die laterale zuklappende (closed-wedge) hohe Tibiaosteotomie (cHTO) etablierte sich v.a. durch die Arbeiten von Coventry et al. Mitte der 60er Jahre [56,57]. Hierbei erfolgt eine zweifache laterale keilförmige Osteotomie der proximalen Tibia mit medial intakter Kortikalis sowie einer Verkürzung der Fibula. Nach Entfernung des Knochenkeils werden die unter Kompression stehenden Osteotomieflächen mit Hilfe unterschiedlicher Osteosyntheseverfahren fixiert und stabilisiert. Initial bietet die große Osteotomiefläche Stabilität, eine schnellere Knochenheilung und eine frühere Gewichtsbelastung. Mögliche Nachteile und Komplikationen stellen z.B. die intraoperative unflexiblere Korrektur, ein Kompartmentsyndrom, die Verletzung des Nervus peroneus und eine Beinverkürzung dar [78].

Mittlerweile hat die oHTO die cHTO als Goldstandard bei der Varusgonarthrose abgelöst. Grund dafür waren nicht nur die Nachteile der cHTO, sondern auch die exaktere Operationstechnik der oHTO sowie der Einsatz neuer winkelstabiler Implantate, die auch bei der oHTO zum sicheren Heilungsergebnis führten [79]. Technisch wird die proximale Tibia von mediokaudal nach laterokranial unter Belassen einer 10 mm breiten lateralen Knochenbrücke osteotomiert. Die biplanare Osteotomie wird durch einen Schnitt im Winkel von  $110^\circ$  retrotuberositär zur Hauptebene vollendet und garantiert eine höhere Stabilität (siehe Abb. 3e)[48]. Gleichzeitig kann durch eine Ausbalancierung der Tibiagelenkfläche („tibial slope“) eine bestehende anteriore oder posteriore Kreuzbandinstabilität mit adressiert werden [80,81]. Abschließend wird der Osteotomiespalt um den geplanten Winkel mit hohem Korrekturpotential aufgespreizt und mit einer Plattenosteosynthese meist ohne Interponat verstärkt [48]. Eine zusätzliche Stabilisation mittels osteokonduktiven Knochenersatzmaterialien oder autologer Spongiosa wird erst bei einem Öffnungswinkel  $> 10^\circ$  und Risikopatienten (Raucher, Osteoporose, Übergewicht) empfohlen [82,83]. Die winkelstabilen Implantate zielen auf den Verzicht von Interponaten und die Minimierung eines Korrekturverlustes durch erhöhte Stabilität ab. Anfang der 90er Jahre etablierte sich zunächst die Puddu-Platte mit integriertem Abstandshalter weltweit [84,85]. Als Alternative folgte mit der Locking Compression Plate (LCP) ein System aus einem winkelstabilen Platten- und Schraubenverbund [86]. Die konsequente Weiterentwicklung der LCP bildet derzeit die TomoFix-Platte, die eine höhere Stabilität, eine geringere Komplikationsrate und ein hohes Korrekturpotential mit guten klinischen Ergebnissen bei gleichzeitigem Verzicht eines Interponats gewährleistet [48,87].

Liegt der Deformitätsort für die Varusgonarthrose nicht im Bereich der Tibia sondern am Femur, würde eine Tibiaosteotomie trotz korrekter mechanischer Beinachse zu einer pathologischen Kniegelenksebene mit erhöhten Scherkräften führen [12,88]. Dementsprechend ist bei einer femoralen Deformität eine cDFO zu empfehlen [12,71]. Im Vergleich zu der oHTO besteht hier die Schwierigkeit in der präzisen Resektion des Knochenkeils [71]. Dabei erfolgt der Osteotomieschnitt am distalen Femur von laterokranial nach mediakaudal unter Erhalt einer 5 mm breiten medialen Kortikalisbrücke (sog. Hinge). Zusätzlich wird seit einigen Jahren ein nach proximal ziehender biplanarer Schnitt im anterioren



Viertel des Femurs im Winkel von 90-95° zur Hauptebene durchgeführt, der nach 2-5 cm die vordere Kortikalis komplett durchtrennt. Diese kombinierte Schnitttechnik führt zu einer erhöhten Primärstabilität, größeren Knochenkontaktfläche, einem verringerten Keilvolumen und damit zu einer verbesserten Knochenheilung [71,89]. Anders als bei der Tibia bestehen beim Femur auf Grund der nicht parallel verlaufenden mechanischen und anatomischen Beinachse beträchtliche Scher- und Biegekräfte, die eine stabile Osteosynthese mit hoher Kompression unerlässlich machen [13]. Hierbei steht zur endgültigen Fixierung die anspruchsvollere klassische 95°-Kondylenklingenplatte und die neu entwickelten winkelstabilen Plattensysteme (z.B. mediale oder laterale TomoFix-Femurplatte) zur Verfügung [71,89,90]. Als potentielle Nachteile und Komplikationen können sich die anspruchsvolle Operationstechnik, die Gefahr eines medialen Kortikalisbruchs mit sekundärem Korrekturverlust, eine verzögerte Knochenkonsolidierung, die Verletzung der Arteria/Vena femoralis, das Risiko einer Beinvenenthrombose oder die postoperative Bewegungseinschränkung darstellen [71,91].

### 1.4 Zielstellung

Die vorliegende Studie wurde konzipiert, um anhand eines Patientenkollektivs mit varischer Beindeformität die beiden aktuell häufigsten kniegelenksnahen Umstellungsosteotomien (oHTO, cDFO) mittels Plattenosteosynthese hinsichtlich der klinischen und radiologischen Ergebnisse zu evaluieren. Zum Vergleich wurden klinische, funktionelle und radiologische Messgrößen herangezogen. Im Rahmen standardisierter prä- und postoperativer Untersuchungen wurden diese Messwerte inklusive der klinischen Scores bereits während der Behandlung erhoben. Gleichzeitig sollen den einzelnen operativen Verfahren inhärente Vor- und Nachteile aufgezeigt und mit den in der Literatur aufgetretenen Fragestellungen diskutiert werden.

Folgende spezifische Fragestellungen soll die Studie beantworten:

- Wie genau konnte die Achskorrektur im Vergleich zur präoperativen Planung durchgeführt werden?
- Lässt sich eine Verbesserung der präoperativen klinischen Scores postoperativ feststellen?

- Besteht ein unterschiedliches radiologisches oder klinisches postoperatives Ergebnis zwischen oHTO und cDFO?
- Kommt es durch die beiden Operationstechniken zu einer unbeabsichtigten Veränderung des tibialen Slopes, dem anatomischen posterioren distalen Femurwinkel (aPDFW) und der Patellahöhe?

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Ein- und Ausschlusskriterien**

Voraussetzung für den Studieneinschluss war eine varische Beindeformität mit kniegelenksnaher Umstellungsosteotomie mittels oHTO oder cDFO und vollständigen prä- und postoperativen Untersuchungen sowie eine schriftliche Einwilligung des Patienten zur Studienteilnahme. Ausgeschlossen wurden Datensätze mit abgelehnter Einverständniserklärung, inkompletter Datenerhebung, nicht auswertbare prä- und post-operativer LAiS und simultane Multilevel-Umstellungsosteotomien.

### **2.2 Patientenkollektiv**

Am Standort Innenstadt des Klinikums der Universität München führte die Abteilung 3D-Chirurgie der Klinik für Allgemeine-, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie zwischen 2009 und 2017 an 30 Patienten kniegelenksnahe Umstellungsosteotomien mit Plattenosteosynthese durch. Die Studie wurde entsprechend der WMA Deklaration von Helsinki unter dem Ethikkommissionsvotum mit der Nummer 19-240 durchgeführt. Alle Patienten willigten schriftlich ein an dieser Studie teilnehmen zu wollen.

5 Patienten konnten aufgrund der oben genannten Kriterien nicht eingeschlossen werden, so dass 28 valgisierende Umstellungsosteotomien an 25 Patienten untersucht werden konnten. Bei den Umstellungen wurden 11 femoral und 17 tibial durchgeführt. Bei zwei Patienten musste eine zweizeitige bifokale Umstellung an einer Extremität erfolgen. Als Ursache der varischen Beindeformität sind 9 anlagebedingte-, 14 wachstumsbedingte- und 5 posttraumatische Fehlstellungen zu nennen. Der Body Mass Index (BMI) nach WHO Definition betrug zum Operationszeitpunkt im Mittel  $25 \pm 1 \text{ kg/m}^2$  in der oHTO Gruppe und  $29 \pm 2 \text{ kg/m}^2$  in der cDFO-Gruppe [92]. Insgesamt lagen 41% in der oHTO-Gruppe und 73% in der cDFO-Gruppe über dem empfohlenen Normalgewicht. Die weiteren Charakteristika des Patientenkollektivs sind in der Tabelle 1 veranschaulicht.

**Tabelle 1: Charakteristika des Patientenkollektivs**

Patientenkollektiv	oHTO	cDFO
Anzahl Patienten (n (%))	14 (56%)	11 (44%)
Anzahl Osteotomien (n (%))	17 (61%)	11 (39%)
Durchschnittsalter bei Operation (Jahre $\pm$ SD (Grenzen))	37 $\pm$ 3 (16-61)	45 $\pm$ 4 (23-64)
Geschlecht (M:F)	9:8	9:2
Mittelwert BMI (kg/m <sup>2</sup> ) bei Operation ( $\pm$ SD (Grenzen))	25 $\pm$ 1 (17-30)	29 $\pm$ 2 (24-46)
Untergewicht: <18,5 kg/m <sup>2</sup> (n (%))	1 (6%)	0
Normalgewicht: 18,5-24,9 kg/m <sup>2</sup> (n (%))	9 (53%)	3 (27%)
Übergewicht: 25-29,9 kg/m <sup>2</sup> (n (%))	7 (41%)	6 (55%)
Adipositas: >30 kg/m <sup>2</sup> (n (%))	0	2 (18%)
Seite (rechts:links)	9:8	6:5
Ätiologie		
anlagebedingt (n)	7	2
wachstumsbedingt (n)	8	6
posttraumatisch (n)	2	3
Durchschnittliches Follow-up (Monate ( $\pm$ SD))	41 $\pm$ 6	55 $\pm$ 8

## 2.3 Behandlungsregime bei Varusdeformitäten

### 2.3.1 Präoperative Planung nach der EPF-Methode

Bei der Erstvorstellung der Patienten erfolgt eine ausführliche Anamnese. In der anschließenden klinischen Untersuchung wird anhand eines standardisierten Befundbogens das Bewegungsausmaß, die Stabilität sowie Funktion des Kniegelenkes und der angrenzenden Gelenke bestimmt. Gleichzeitig erfolgt die Erhebung des funktionellen sowie klinischen Status mit Hilfe des Lysholm-Scores, des Short-Form-36 Health Survey (SF-36), der Visual-Analog-Scale (VAS) und des BMI. Ebenfalls werden mögliche Achs-/Torsionsdeformitäten, Fußfehlstellungen, Beinlängendifferenzen als auch knöcherne Defekte in der Behandlungsplanung berücksichtigt. Je nach Komplexität der Deformitäten wird neben der LAiS und seitlichen Röntgenaufnahme eine zusätzliche Computertomografie mit Beinlängen sowie Torsionsmessung durchgeführt.

Für den operativen Erfolg der kniegelenksnahen valgisierenden Achskorrektur ist eine präzise präoperative Planung essentiell. Ermöglicht wird dies durch die sogenannte EPF-Planung. Ausgangspunkt ist hierbei das zuerst geplante postoperative Ergebnis nach der Achskorrektur, von dem dann zum ursprünglichen Zustand zurück geplant wird.

Dementsprechend wird von jedem Patienten eine LAiS angefertigt. Der Patient steht hierfür aufrecht mit durchgestreckten Knien und gleichmäßiger Gewichtsverteilung auf beiden Beinen. Die Patella wird streng nach vorne ausgerichtet und liegt zentriert über den Femurkondylen. Eine vorhandene Beinlängendifferenz wird mit 0,5 cm bis 1,0 cm Unterlegbrettchen bis zum Beckengradstand ausgeglichen. Anschließend wird anhand der radiologischen Aufnahme eine mögliche Achsfehlstellung bestimmt und der Ort der Deformität identifiziert. Dies bildet die Grundlage für die geplante Operation. Die Analyse der Beingeometrie sowie die Operationsplanung erfolgen im Grafikprogramm CorelDRAW Graphics Suite X7.

### Analyse

Die Normwerte der Achsverhältnisse der unteren Extremität sind in der Literatur mehrfach beschrieben [29,32,67,93,94]. Jedoch sind die Werte und Winkelbezeichnungen sowie die Methoden zu deren Bestimmung inkonsistent [95]. Paley und Herzenberg vereinten diese unterschiedlichen Ansichten zu einer gemeinsamen Definition und Nomenklatur [34,67]. Standardmäßig werden die Achsen und Gelenkwinkel in der Frontalebene als LAiS und in der Sagittalebene als laterale Röntgenaufnahme in 30° Kniebeugung erhoben [96].

Für die Auswertung der Beingeometrie werden zunächst die Gelenkzentren festgelegt und in der Röntgenganzbeinaufnahme in CorelDRAW Graphics Suite X7 eingezeichnet:

- **Hüftkopfzentrum (HKZ):** Mittelpunkt des Hüftkopfes, welcher mit Hilfe einer konzentrischen Kreismesslehre bestimmt wird [34].
- **Kniegelenkszentrum (KGZ):** Mittelpunkt der halbierenden Verbindungslinie zwischen der Femurnotch und dem Mittelpunkt des Tibiaplateaus.

Nach Moreland et al. gibt es fünf mögliche Kniegelenkszentren [32]. Der obere Punkt der Fossa intercondylaris (Femurnotch) oder der Mittelpunkt zwischen der Eminentia intercondylaris haben sich als sinnvoll erwiesen [34,95].

**Oberes Sprunggelenkszentrum (OSGZ):** Mittelpunkt der proximalen subchondralen Talusgelenkfläche [34].

Nachdem die Referenzpunkte der Gelenkzentren definiert sind, können folgende Beinachsen eingezeichnet werden:

- **Mechanische Femurachse:** Verbindungslinie zwischen HKZ und Femurnotch [70].
- **Anatomische Femurachse:** zentrale Linie durch die Diaphyse.
- **Tibiaachse:** mechanische und anatomische Linie verlaufen annähernd deckungsgleich, die anatomische Linie leicht parallel nach lateral versetzt, zwischen OSGZ und Mittelpunkt des Tibiaplateaus [34].
- **mechanische Beinachse (Mikulicz-Linie):** Verbindungslinie zwischen HKZ und OSGZ. Normal verläuft die Traglinie medial des Kniezentrums. In der Literatur beschriebene Normwerte sind nach Paley et. al (2000)  $8 \pm 7$  mm und nach Bhavre et. al  $4,1 \pm 4$  mm [31]. Im Allgemeinen wird der 4 mm Punkt medial des Kniegelenkszentrums herangezogen [23].

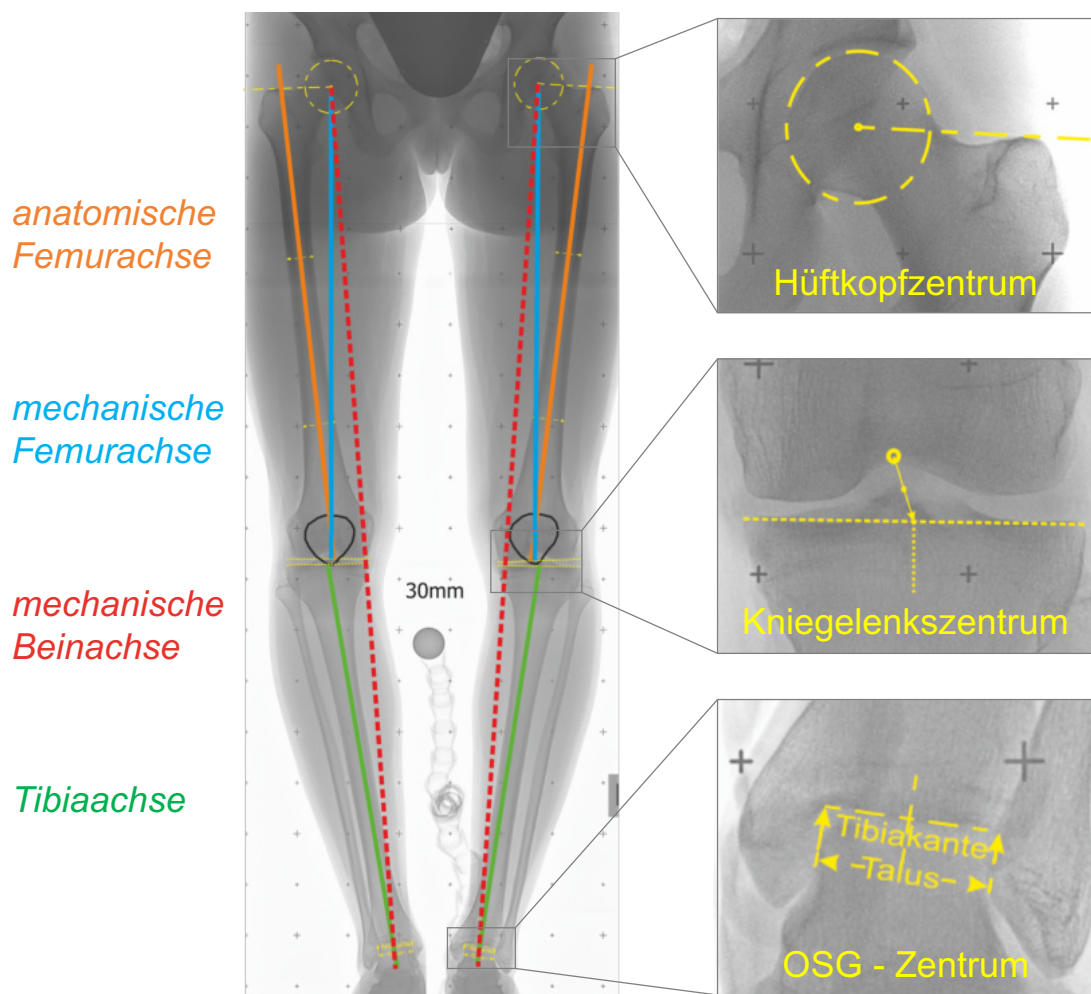
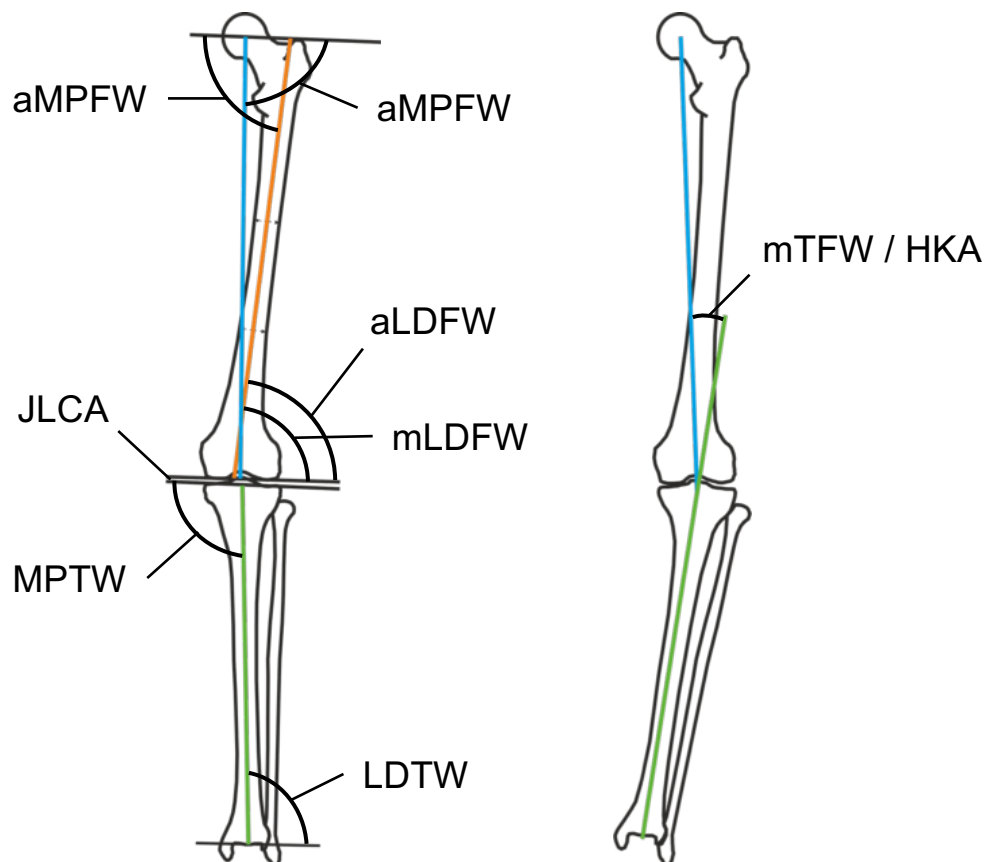


Abbildung 4: Beinachsen und Gelenkzentren [34]

Darauffolgend werden die in Tabelle 2 dargestellten Winkel an den anatomischen und mechanischen Achsen durch Tangentenbildung an den subchondralen Gelenkflächen der distalen Femurkondylen (femorale Kniegelenkslinie), dem proximalen Tibiaplateau (tibiale Kniegelenkslinie) und dem oberen Sprunggelenk gebildet. Normalerweise laufen tibiale und femorale Kniegelenkslinie nahezu parallel mit einem JLCA von 0-2° [34].

**Tabelle 2: Physiologische Winkel in der Frontalebene [34]**

Winkel	Norm	Grenzen
anatomischer medialer proximaler Femurwinkel ( <b>aMPFW</b> )	84°	80-89°
mechanischer lateraler proximaler Femurwinkel ( <b>mLPFW</b> )	90°	85-95°
mechanischer lateraler distaler Femurwinkel ( <b>mLDFW</b> )	87°	85-90°
anatomischer lateraler distaler Femurwinkel ( <b>aLDFW</b> )	81°	79-83°
medialer proximaler Tibiawinkel ( <b>MPTW</b> )	87°	85-90°
Lateraler distaler Tibiawinkel ( <b>LDTW</b> )	89°	86-92°
Joint Line Convergence Angle ( <b>JLCA</b> )	0°	0-2°



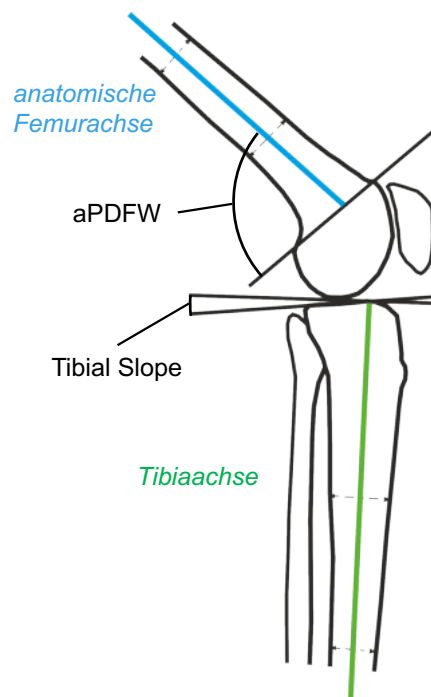
**Abbildung 5: Physiologische Winkel in der Frontalebene (Abkürzung siehe Tabelle 2), modifiziert aus [34]**

In der Sagittalebene sind zwei weitere Parameter zu erheben (Abbildung 6):

- **Tibial Slope:** Winkel zwischen der senkrechten der seitlichen Längsachse des Tibiaschaftes und der parallelen Tangente des medialen Tibiaplateaus [97]. Eine merkliche Abweichung des tibialen Slopes kann zu einer Veränderung des Roll-Gleit-Verhalten und der Druckbelastung im Tibiofemoralgelenk führen [98].
- **aPDFW:** Winkel zwischen der Verbindungslinie des vorderen und hinteren s-bogenförmigen Überganges der Kondylen zur Metaphyse (bei Kindern die Wachstumsfuge) und der seitlichen anatomischen Femurachse. Dieser gibt Auskunft über die Flexions-Extensions-Stellung des distalen Femurs zur anatomischen Femurachse [31].

**Tabelle 3: physiologische Winkel in der Sagittalebene [13,31]**

Winkel	Norm	Streuung
Tibial Slope	10°	0-10°
anatomischer posteriore distale Femurwinkel (aPDFW)	83°	79-89°



**Abbildung 6: Bestimmung des aPDFW und Tibial Slope, modifiziert aus [34]**



Als letzter Schritt ist die Beinlänge zu erfassen, um die Höhe der Beinlängendifferenz und den Ort der Verkürzung (Femur/Tibia) zu bestimmen. Für die gesamte Beinlänge wird eine Linie vom höchsten Punkt des Hüftkopfes zum OSGZ gezogen. Die Femurlänge ergibt sich aus einer Geraden vom höchsten Punkt des Hüftkopfes zum KGZ. Analog wird die Tibialänge durch eine Linie vom OSGZ zum KGZ ermittelt. Eine open-wedge Osteotomie verlängert im Gegensatz zur closed-wedge Osteotomie den Knochen. Damit kann sowohl bei einer open-wedge als auch einer closed-wedge Osteotomie neben der Achskorrektur ein Beinlängenunterschied zu einem geringen Grad ausgeglichen oder verstärkt werden.

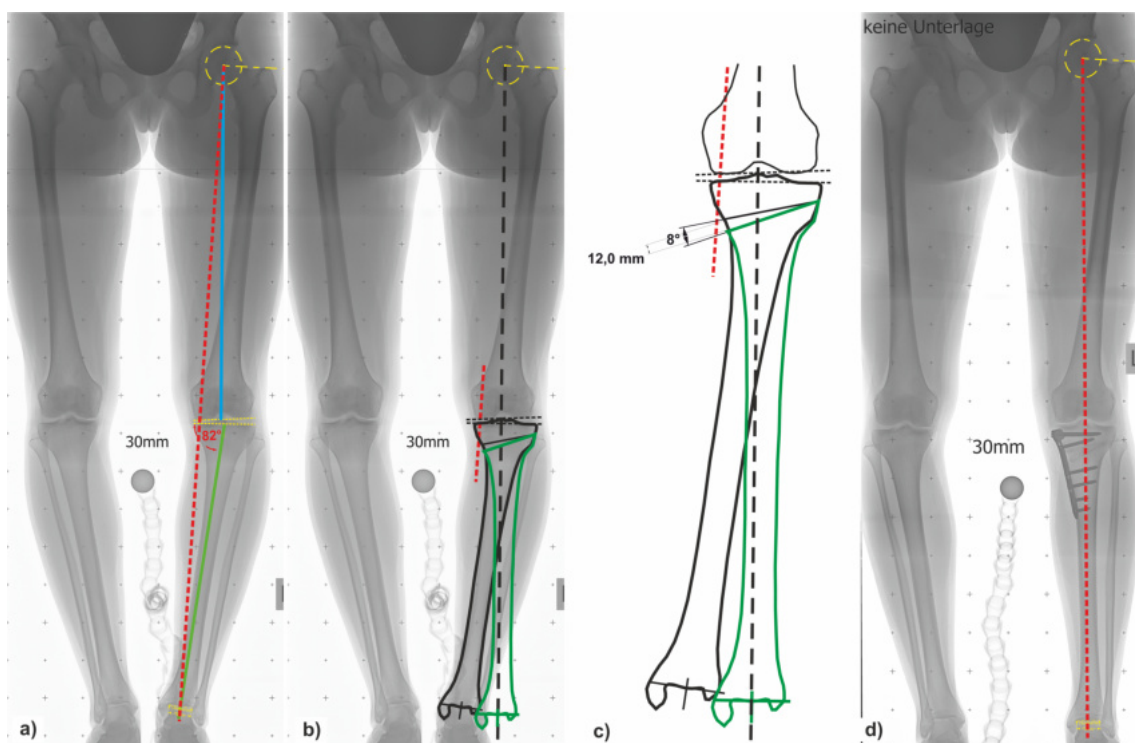
### **Planung einer monofokalen Achskorrektur**

Die monofokale Achskorrektur wird angewendet, wenn bei der Analyse eine varische oder valgische Achsfehlstellung auf Grund einer isolierten Deformität von Tibia oder Femur festgestellt wird. Die Planung wird daraufhin explizit für diese Fehlstellung erstellt. Falls möglich sollte die Korrektur innerhalb der Norm zwischen  $90^\circ$  und  $85^\circ$  für den mLDFW und MPTW erfolgen. Um einen zweiten Eingriff zu vermeiden, kann eine Überkorrektur bei einigen Patienten sinnvoll sein. Diese sollte aber nicht mehr als  $3^\circ$  von den Normwerten abweichen.

Zuerst wird die neue mechanische Beinachse geplant. Hierfür dienen, unabhängig von der Deformität, stets zwei Fixpunkte an jeweils zwei unterschiedlichen Gelenkszentren als Orientierungshilfen für die neue Achsausrichtung. Im Falle einer Korrektur der Tibia wird eine Gerade ausgehend vom HKZ über das KGZ hinaus nach distal gezogen. Als Fixpunkte für eine Korrektur des Femurs dienen dagegen das OSGZ und das KGZ. Anschließend wird das neue OSGZ bzw. HKZ, liegend auf der neuen mechanischen Beinachse, geplant. Für das neue OSGZ wird ausgehend vom HKZ die in der Analyse erhobene Beinlänge nach distal abgemessen und das neuen OSGZ mit einem Punkt markiert. Sinngemäß bestimmt man das neue HKZ durch die Beinlänge beginnend vom OSGZ.

Als nächstes wird mit Hilfe der Markierfunktion der CorelDRAW Graphics Suite X7 die Kontur der Tibia bzw. des Femurs markiert. Die Osteotomiehöhe liegt bei der medialen oHTO ca. 4 cm distal der Tibiagelenkfläche bzw. bei der lateralen

cDFO 4-8 cm supracondylär am Femur. Die dazugehörige Osteotomielinie beginnt bei der oHTO auf der Höhe des S-förmigen Übergangs des Tibiakopfes zum Tibiaschaft und zieht Richtung Fibulaspitze. Bei der cDFO verläuft die Osteotomielinie ca. 7-8 cm supracondylär annähernd parallel zur Gelenklinie. Ein vorgefertigter Dummy der Implantate hilft beim Abschätzen der passenden Größe und kann bei der 95°-Kondylenklingenplatte anhand der Femurkondylenbreite ermittelt werden. Schließlich wird das entsprechende Fragment mit dem aktuellen HKZ auf das neue HKZ bzw. aktuelle OSGZ auf das neue OSGZ ausgerichtet.



**Abbildung 7: Monofokale Achskorrektur**

a) präoperative Analyse, b) monofokale Planung, c) Planskizze, d) postoperative mechanische Beinachse

### Planung einer bifokalen Achskorrektur

Bei Vorliegen einer pathologischen Achsfehlstellung mit gleichzeitigen abnormalen Werten des MPTW sowie des mLDFW wird eine Achskorrektur des Femurs als auch der Tibia angestrebt.

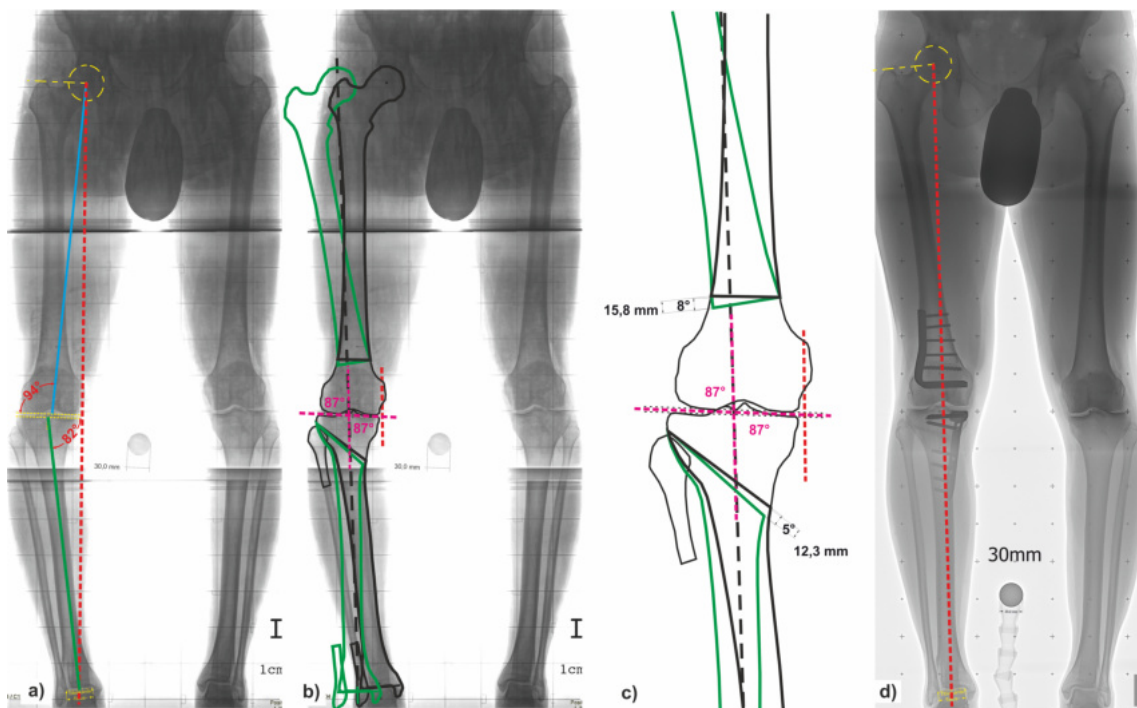
Dabei können im Vergleich zur monofokalen Achskorrektur nicht die gleichen Fixpunkte für die Umstellungsosteotomien genutzt werden. Stattdessen stehen für die Planung der neuen mechanischen Beinachse nur das KGZ als Fixpunkt

und die beiden festgelegten Gelenkwinkel (MPTW und mLDFW) zur Verfügung. Normiert werden die Gelenkwinkel meist mit  $87^\circ$  und bewegen sich somit im physiologischen Bereich von  $85^\circ$  bis  $90^\circ$ .

Zuerst werden die femoralen und tibialen Kniegelenkslinien bestimmt. Danach wird eine Gerade eingezeichnet, die die Kniegelenkslinie senkrecht auf Höhe des KGZ mit einem Winkel von  $87^\circ$  beim MPTW und  $87^\circ$  mLDFW schneidet. Diese stellt die neue mechanische Beinachse dar.

Es kann dazu kommen, dass von der geplanten mechanischen Achse auf Höhe des KGZ abgewichen werden muss. Die Anpassung erfolgt hierbei durch eine mediale oder laterale Verschiebung der neuen mechanischen Beinachse entlang der Kniegelenksebene bis zum gewünschten Korrekturziel.

Zum Schluss werden auf der neuen mechanischen Beinachse die in der Analyse erhobenen Beinlängen eingetragen sowie das neue HKZ und das neue OSGZ bestimmt. Die weiteren Handlungsschritte für Tibia und Femur gleichen den unter der monofokalen Achskorrektur beschriebenen.



**Abbildung 8: Bifokale Achskorrektur**

a) präoperative Analyse, b) bifokale Planung, c) Planskizze, d) postoperative mechanische Beinachse

### **2.3.2 Operationstechnik**

#### **oHTO**

Die biplanare Osteotomie der proximalen Tibia wurde in Anlehnung an die Operationstechnik von Staubli et al. und der Arbeitsgemeinschaft Osteosynthese (AO-Stiftung) durchgeführt [48,99]. Zu Beginn wird eine Arthroskopie des Kniegelenkes zur Sicherung und Anpassung der geplanten Achskorrektur je nach Befund des Knorpelschadens, der Menischi und Kreuzbänder durchgeführt. Nach der Kniegelenksarthroskopie erfolgt eine Achskontrolle mit der Planfeldmethode. Diese wird mit der präoperativen Planung verglichen. Daraufhin werden die Landmarken unter Röntgenkontrolle angezeichnet. Der ca. 5 cm lange Hautschnitt erfolgt nach Tasten des Ansatzes des Pes anserinus von der Tuberositas tibiae nach medial proximal an der oberen Grenze des Pes anserinus. Die meist stumpfe Präparierung des Plattenlagers erfolgt schichtweise unter Schonung eines sensiblen Nervenastes bis zur Spaltung der Faszie über der geplanten Osteotomie. Die weiterführende distale stumpfe Präparation mit dem Raspatorium schafft das endgültige Plattenlager entlang der Tibia und zeigt den distalen medialen Ansatz der Patellasehne. Ein stumpfes Release des Innenbandes und Pes anserinus ist durchzuführen. Danach werden zwei K-Drähte ca. 4cm distal der Gelenklinie parallel zum tibialen Slope ansteigend mit Zielrichtung auf das Fibularköpfchen eingebracht. Die Drähte dienen der Osteotomieführung und erliegen in der Gegenkortikalis. Die Hauptosteotomie führt entlang der K-Drähte bis zur lateralen Kortikales unter Belassung eines ca. 1 cm breiten Hinges. Dabei wird die oszillierende Säge ständig mit Wasser gekühlt und zum Schutz der Weichteile werden zwei Homann-Hebel ventral und dorsal der Tibia eingebracht. Der biplanare Schnitt wird mit einer oszillierenden Säge posterior der Tuberositas tibiae in einem 110° Winkel zur geplanten transversalen Hauptosteotomie auf einer Länge von ca. 2 cm durchgeführt. Eine ausreichende knöcherne Verbindung von etwa 1 cm Dicke im Bereich des Patellasehnenansatzes bleibt bestehen. Nach Abschluss des Sägeschnitts erfolgt das langsame, schrittweise Weiten des Osteotomiespaltes unter Zuhilfenahme sukzessiv größer werdender Lambot-Meißel zur Vorbeugung einer Fraktur im lateralen Kortex. Der Osteotomiespalt wird entsprechend der präoperativen Planung gespreizt. Zur Sicherung des Spaltes nach Entfernung der Lambot-Meißel wird ein Osteotomiespreizer eingesetzt. Nach Abschluss der

Osteotomie erfolgt eine erneute Achskontrolle mit Hilfe der Planfeldmethode. Hierdurch kann intraoperativ die Achskorrektur im Gegensatz zur cHTO nachjustiert werden. Fixiert wird die Osteotomie mit einer winkelstabilen TomoFix-Platte mit zusätzlicher Anrauhung der Osteotomiefläche mittels scharfen Löffels. Lediglich bei zwei Patienten wurde ein Knochenspankamm auf Grund der Größe des Osteotomiespaltes eingesetzt. Die abschließende Achskontrolle mittels Planfeldmethode dokumentiert die Plattenlage und das postoperative Ergebnis der Achskorrektur.

### **cDFO**

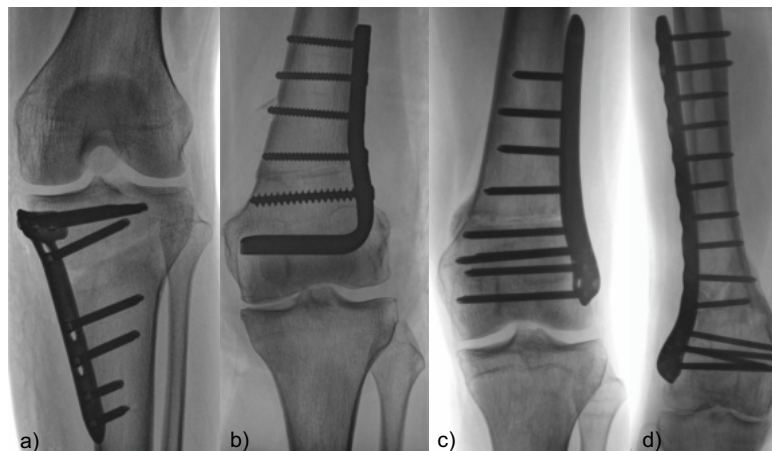
Die Vorgehensweise der Arthroskopie und der Achskontrolle mit Hilfe der Planfeldmethode sind bis zum Hautschnitt analog zur oHTO durchzuführen. Das weitere operative Vorgehen erfolgt nach Lobenhoffer et al. [23]. Der 10 cm lange Hautschnitt beginnt 3-4 cm proximal der Gelenklinie im Bereich des distalen lateralen Femurs ventral der Begrenzung des Tractus iliotibialis. Nach stumpfem Präparieren wird die Faszie am ventralen Rand des Tractus iliotibialis längsgespalten und der Musculus vastus lateralis vom lateralen Femur von proximal nach distal abgelöst. Der distale Ansatz wird hierbei scharf von der Kondyle abgelöst und das Periosts nach ventral und dorsal mobilisiert. Das Kniegelenk selbst wird bei der Präparation nicht eröffnet.

Als nächstes werden unter Bildwandlerkontrolle vier K-Drähte zur Osteotomieführung gesetzt. Die ersten zwei K-Drähte werden ca. 7 cm proximal des Kniegelenksspalts parallel zur Kniegelenkslinie eingebracht. Die beiden anderen K-Drähte werden unter Berücksichtigung der präoperativ geplanten lateralen Keilhöhe eingesetzt werden. Zum Schutz der Weichteile wird das Femur ventral und dorsal der durchzuführenden Sägeschitte mit Hohmann-Haken umfahren. Die Osteotomie entlang der K-Drähte wird unter ständiger Wasserkühlung mittels oszillierender Knochensäge durchgeführt, wobei medialeseitig eine Kortikalislamelle als sog. Hinge belassen wird. Nach Beendigung des Sägeschnitts und Entfernung des Knochenkeils erfolgt das langsame und schonende Zuklappen des Osteotomiespaltes unter Bildwandlerkontrolle. Zudem wird die Beinachse erneut mit der Planfeldmethode kontrolliert. Bei Übereinstimmung mit der präoperativen Planung wird die Osteotomie mit einer 95°-Kondylenklingenplatte, einer LISS-DF- oder einer NCB-

DF-Platte fixiert. Im Vergleich zu den anderen beiden Platten muss bei der 95°-Kondylenklingenplatte eine zusätzliche Präparation für das Klingenlager erfolgen. Dafür werden unter mehrfacher Röntgenkontrolle drei K-Drähte ca. 2 cm proximal der Kniegelenkslinie mittels Parallelbohrbüchse gesetzt. Zur Erhöhung der Präzision werden eigens angefertigte Reduzierhülsen in das Zielgerät eingeschoben um eine genauere Lage der parallelen Drähte zu realisieren. Das zukünftige Klingenlager besitzt hierbei nach präoperativer Planung einen leichten Anstieg. Zusätzlich kann bei einem diagnostizierten Streck- oder Beugedefizit durch Drehung im Klingenlager mit milder Re- oder Antekurvatur im distalen Femur entgegengewirkt werden. Als nächster Schritt wird über die Drähte mittels kanüliertem Bohrer das Klingenlager vorgebohrt und anschließend die Drähte entfernt. Mit dem Klingensetzmeißel wird das Klingenlager weiter konfektioniert und anschließend die 95°-Kondylenklingenplatte in das Plattenlager eingeschlagen und fixiert. Die abschließende Achskontrolle mittels Planfeldmethode dokumentiert die Plattenlage und das postoperative Ergebnis der Achskorrektur.

### 2.3.3 Verwendete Implantate

Als Implantate kamen für die oHTO ausschließlich TomoFix-Platten zur Anwendung. Bei der cDFO wurden neben der häufig verwendeten 95°-Kondylenklingenplatte auch winkelstabile LISS-DF (Fa. Synthes) und NCB-DF-Platten (Fa. Zimmer) implantiert.



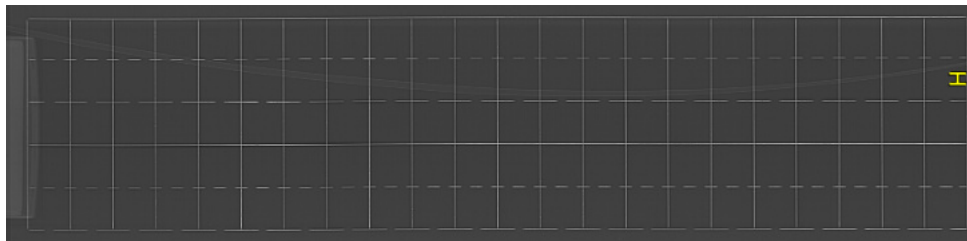
**Abbildung 9: Verwendete Implantate**

- a) TomoFix-Platte (MHT, Synthes) b) 95°-Kondylenklingenplatte c) LISS-DF-Platte (Synthes)  
d) NCB-DF-Platte (Zimmer)

### 2.3.4 Intraoperative Achskontrolle via Planfeldmethode

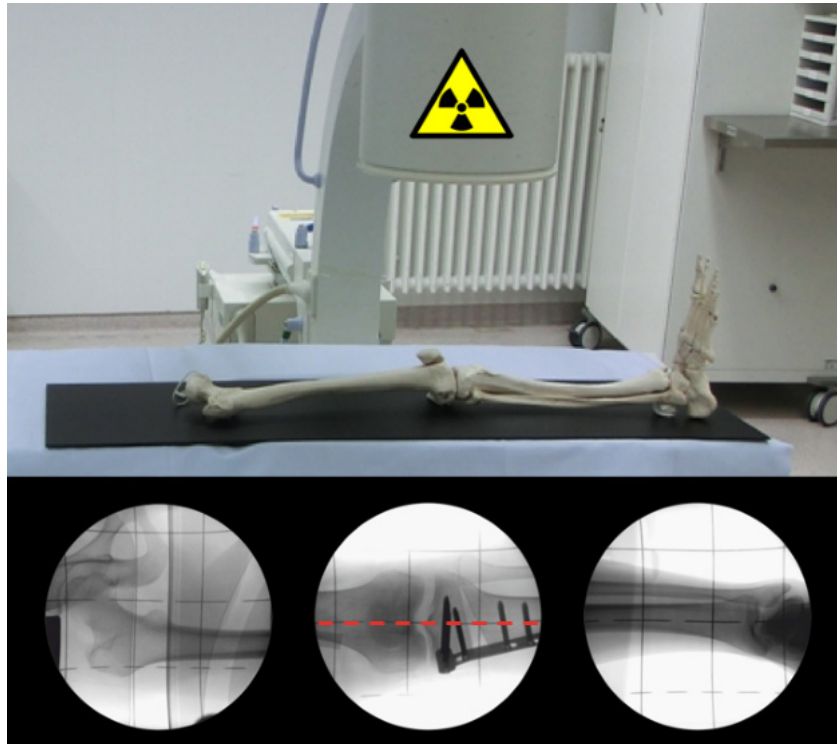
Außerhalb des Operationssaals kann die Beinachse mittels LAiS bestimmt werden. Beim liegenden Patienten ist dies intraoperativ so nicht möglich. Um das Ausmaß der Achskorrektur intraoperativ möglichst exakt bestimmen zu können, wird ein extra entwickeltes Planfeld eingesetzt.

Das Planfeld besteht aus einer speziell angefertigten 3 mm dünnen röntgendurchlässigen, glasfaserverstärkten Kunststoffplatte (Maß: 1114 x 290 x 3 mm), in die verschiedene gestrichelte Linien mit röntgendichtem Material eingearbeitet sind. Die sechs Referenzlinien für die mechanische Beinachse erstrecken sich in regelmäßigen Abständen von 50 mm über die gesamte Länge der Platte (Abbildung 10).



**Abbildung 10: Planfeld mit Referenzlinien**

Das Board ist unter einer Gel-Polsterung auf dem Operationstisch platziert und bedarf durch das Patientengewicht keiner weiteren Fixierung. Mit Hilfe des Röntgengerätes werden prä- und postoperativ a.-p. Aufnahmen von Hüft-, Knie- und oberes Sprunggelenk aufgenommen. Zuerst werden bei zentrierter Patella das HKZ und das OSGZ auf einer Referenzlinie eingestellt (keine Rotation). Danach wird eine Aufnahme des Kniegelenkes zur Beurteilung der MAD erstellt. Während einer Aufnahmeserie darf keine Lageänderung der Beinachse erfolgen. Eine ähnliche Methode wurde 1991 von Saleh et al. beschrieben [100].



**Abbildung 11: Planfeld intraoperativ**

### **2.3.5 Nachbehandlung**

Direkt nach der Operation wird ein steriler Watte-Kompressionsverband angelegt. Die passive und aktive Durchbewegung des Kniegelenkes beginnt am ersten postoperativen Tag mit Unterstützung eines Physiotherapeuten. In den darauffolgenden Tagen wird eine Mobilisation an Gehstützen bis hin zur selbständigen Mobilität bei Entlassung angestrebt. Für die ersten 6 Wochen ist die Teilbelastung an Gehstützen auf 20 kg begrenzt. Begleitend erfolgen in regelmäßigen Abständen weitere Physiotherapieeinheiten zur Verbesserung der range of motion (ROM), des Muskelaufbaus des Quadrizeps, der Harmonisierung des Gangbildes sowie manuelle Lymphdrainagen zur Vorbeugung von Lymphödem. Nach der sechsten postoperativen Woche kommen die Patienten in die ambulante Sprechstunde zur klinischen Nachuntersuchung und Röntgenkontrolle in zwei Ebenen. Bei regelgerechtem Befund wird den Patienten eine schrittweise schmerzadaptierte Aufbelastung bis zur Vollbelastung erlaubt. Die weiteren Kontrolltermine sind nach 6 bzw. 12 Monaten. Die Metallentfernung ist nach einem Jahr möglich. Nach weiteren 6 Monaten erfolgt die standardisierte Abschlussuntersuchung, welche eine korrigierte Beinachsenkontrolle mittels Röntgenganzbeinstandaufnahme, eine klinische Untersuchung anhand des



Befundbogens sowie die Erhebung des Lysholm-Scores, des SF-36 und der VAS beinhaltet.

Während der Behandlungsphase nehmen die Patienten bis zur knöchernen Konsolidierung Calcium und Vitamin D Präparate ein. Die medikamentöse Thromboseprophylaxe in Form von Enoxaparin wird nach Freigabe der Vollbelastung abgesetzt. Die regelmäßige Wundkontrolle und Entfernung des Nahtmaterials ab dem 14. postoperativen Tag bei entsprechender Wundheilung obliegt dem Hausarzt.

## **2.4 Datenerhebung und -analyse**

### **2.4.1 Datenerhebung**

Alle operativen Deformitätenkorrekturen seit 2009 wurden konsekutiv in einer Datenbank der Abteilung 3D-Chirurgie erfasst. Insgesamt 328 Patienten mit 397 Eingriffen wurden für einen möglichen Studieneinschluss evaluiert. Letztlich ergab sich unter Berücksichtigung der Ein- und Ausschlusskriterien (siehe 2.1) ein Patientenkollektiv von 25 Patienten mit 28 kniegelenksnahen Eingriffen.

Die Erfassung der Patientendaten erfolgte zunächst durch Sichtung der Operationsberichte und der Patientenakten des jeweiligen Patienten. Fehlende Daten wie z.B. postoperative klinische Scores wurden postalisch oder telefonisch bei dem Patienten nachgefragt und ergänzt. Im zweiten Schritt wurden die prä- und postoperativen LAiS und die seitlichen Röntgenbilder in 30° Beugung ausgewertet. Hierfür wurden unter Verwendung der CorelDRAW Graphics Suite X7 für jeden Fall die Beinachsen und Gelenkwinkel ausgemessen. Diese wurden miteinander verglichen um die Genauigkeit der Operationsmethode auf Grundlage der präoperativen Planung mit der EPF-Methode sowie für die zwei verschiedenen Korrekturmöglichkeiten zu evaluieren. Weitere Veränderungen in der Beingeometrie z.B. in Form einer veränderten Patellalage oder des posterioren proximalen Tibiawinkels (tibialer Slope) wurden miterhoben.

### 2.4.2 Auswertung des OP-Berichtes

Der Operationsbericht wurde im Hinblick auf folgende Punkte evaluiert:

- **Operationszeit** in Minuten
- verwendete **Implantate**
- **Kniewarthroskopie** zur Erhebung des Knorpelstatus nach der Outerbridge-Klassifikation [101].

### 2.4.3 Klinischer Verlauf und Komplikationen

Zur Beurteilung des klinischen Verlaufs wurden folgenden Punkte erhoben:

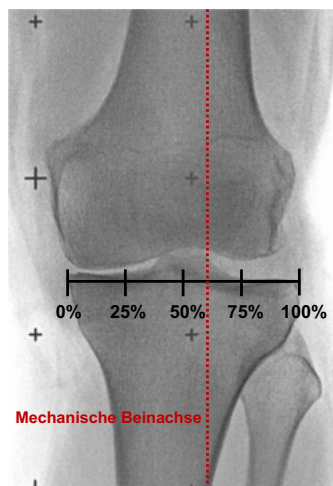
- **Krankenhausliegezeiten** umfassen den Zeitraum nach der Operation bis zur Entlassung in Tagen.
- **ROM** des Kniegelenkes
- **Zeitraum der Teilbelastung** bis zur Vollbelastung in Tagen.
- **Komplikationen** sind verfahrensspezifisch (Gefäßverletzungen), verzögerte Knochenkonsolidierung (Pseudarthrosen), implantatassoziierte Beschwerden (chronische Weichteilirritation und Schmerzen), oberflächliche Wundinfektion, tiefe Wundinfektion, Kompartmentsyndrom oder neurologische Defizite [102].
- **Anzahl und der Zeitraum bis zur Implantatentfernung:** Eine Implantatentfernung wird im Falle von Schmerzen oder Sensibilitätsstörungen im Bereich des Plattenlagers oder auf Wunsch des Patienten frühestens nach 12 Monaten durchgeführt.
- **Gelenkersatz** nach Umstellungsoperation

### 2.4.4 Radiologische Auswertung

Die radiologische Auswertung basierte auf der LAiS unter Belastung mit zentrierter Patella und wurde in Bezug auf die folgenden Punkte ausgewertet:

- **MAD in mm zum Kniegelenksmittelpunkt:** die negative Abweichung in mm der mechanischen Beinachse zum Kniemittelpunkt beziffert ein varisches Knie und ein positiver Wert ein valgisches Knie.

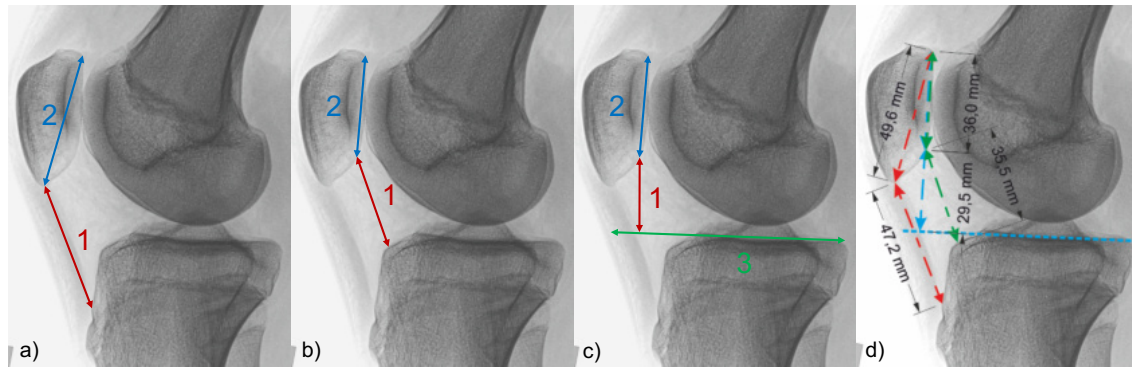
- **HKA:** Winkel zwischen der mechanischen Tibia- und Femurachse. Ein negatives Vorzeichen bezeichnet eine varischen Achsabweichung und ein positives Vorzeichen eine valgische Achsabweichung
- **Mechanische Beinachse:** der Prozentwert bemisst sich aus der Position der mechanischen Beinachse in Relation zur gesamten Tibiaplateaubreite (0 - 100%, mediale Begrenzung 0% und laterale Begrenzung 100%). Ein Verlauf der mechanischen Beinachse außerhalb des Kniegelenks wird mit Werten von <0% bzw. >100% angegeben. Die Korrektur wird bei einem Zielkorridor von  $\pm 5\%$  zur Planung als optimal und bei einer Abweichung von  $\pm 10\%$  als akzeptabel gewertet. Darüber hinaus besteht eine Über- bzw. Unterkorrektur.



**Abbildung 12: Mechanische Beinachse, modifiziert aus [13]**

- Bei einem **mLDFW** < 82° und **MPTW** > 93° wird eine bifokale Korrektur angestrebt.
- Ein **JLCA** mit einem negativen Vorzeichen beschreibt einen geminderten medialen und ein positives Vorzeichen einen geminderten lateralen Gelenkspalt.
- **Größe des Knochenkeils ( $\alpha$ -Winkel)**
- **gesamte Beinlängendifferenz**

Die seitlichen Aufnahmen in 30° Beugung dienten der Erhebung der Patella-Indizes zur Bestimmung der Patellahöhe und der unbeabsichtigten Beeinflussung des Tibial slope sowie des aPDFW:



**Abbildung 13: Patella-Indizes**

a) Insall-Salvati-Index (ISI), b) Caton-Deschamps-Index (CDI) c) Blackburn-Peel-Index (BPI) d) eigene Ausmessung [103–105]

- **Insall-Salvati-Index (ISI)** [103]: Der Quotient ergibt sich aus der Länge der Patellasehne (1) durch die Länge der Patellarückfläche (2).
- **Caton-Deschamps-Index (CDI)** [104]: Der Quotient ergibt sich aus dem Abstand zwischen kaudalem Ende der Patellagelenkfläche und ventralen Tibiaplateau (1) durch die Länge der Patellagelenkfläche (2).
- **Blackburn-Peel-Index (BPI)** [105]: Zunächst Bildung einer Tangente (Tibiaplateaulinie) (3) an das Tibiaplateau. Anschließend ergibt sich der Quotient aus der Strecke der Senkrechten (1) zwischen kaudalem Ende der Patellagelenkfläche und der Tibiaplateaulinie durch die Patellagelenkfläche (2).

**Tabelle 4: Normwerte der Indizes für die Patellahöhe [103–105]**

Index	Patella baja	Patella normal	Patella alta
Insall-Salvati-Index (ISI)	< 0,8	1,0	> 1,2
Caton-Deschamps-Index (CDI)	< 0,6	1,0	> 1,3
Blackburn-Peel-Index (BPI)	< 0,5	0,6	> 1,0

- **Tibial slope**
- **aPDFW**

#### 2.4.5 Planfeldmethode

Die Planfeldmethode ermöglicht den Vergleich der intraoperativen prä- bzw. postoperativen Aufnahmen der mechanischen Beinachse mit den prä- bzw. postoperativen LAiS. Die Genauigkeit wird bei einem Zielkorridor von  $\pm 5\%$  als

optimal und bei einer Abweichung von  $\pm 10\%$  als akzeptabel gewertet. Bei größeren Abweichungen wurde die Übereinstimmung als mangelhaft bewertet.

### **2.4.6 Klinische Scores**

#### **SF-36**

Der SF-36 erfasst die individuelle Lebensqualität eines Patienten und enthält mehrere Fragenkomplexe zur Gesundheit und dem subjektiven Wohlbefinden [106]. Aufgebaut ist der SF-36 in 8 Unterkategorien mit insgesamt 36 Fragen. Diese umfassen die Lebensqualitätsbereiche, soziale und körperliche Funktionsfähigkeit, emotionale und körperliche Rollenfunktion wie auch körperliche Schmerzen, die Vitalität, das psychische Wohlbefinden und die allgemeine Gesundheit. Die zu erreichende maximale Punktzahl entspricht 100 Punkten. Je höher der postoperative Wert bzw. je größer die Verbesserung zum präoperativen Wert ist, desto höher ist die Lebensqualität.

#### **Lysholm-Score**

Der Lysholm Score zeigt den subjektiv beurteilten klinischen Status eines Patienten vor und nach einer Behandlung. Wir benutzten für diese Studie eine modifizierte Form des Lysholm Score [107,108]. Als Grundlage dienen acht symptombezogene Kriterien, zu denen Gehbehinderung, der Einsatz von Gehhilfen, Blockaden, Instabilität bei alltäglichen Aktivitäten, Schmerzen, Schwellung, Treppensteigen und die tiefe Hocke gehören. Die maximale Punktzahl umfasst 100 Punkte. Wobei eine hohe postoperative Punktzahl als auch eine Verbesserung zum präoperativen Wert für ein besseres subjektives Befinden spricht.

#### **VAS**

Die VAS ist ein Maß für das subjektive Schmerzempfinden eines Patienten. Dabei wird die Skala in ganzen Zahlenschritten von 0 bis 10 quantifiziert. Ein Skalenwert von 0 entspricht keinerlei Schmerz im Gegensatz zu einem Skalenwert von 10 mit unerträglich starken Schmerzen [109].

## **2.5 Statistische Auswertung**

Die gewonnenen Daten wurden mit der Software Excel (Version 2018, Microsoft, USA) erhoben sowie verwaltet und statistisch mit SPSS (Version 25, SPSS Inc., Chicago/Illinois, USA) ausgewertet.

Die deskriptiven Ergebnisse wurden mit Mittelwert, Standardabweichung (SD) oder Minimum (min) bzw. Maximum (max) dargestellt.

Die Vergleichsrechnungen zwischen den nicht-normalverteilten Mittelwerten wurden bei unverbundenen Stichproben mit dem Mann-Whitney-U-Test und bei verbundenen Stichproben mit dem Wilcoxon-Vorzeichenstest vorgenommen. Alle statistischen Tests wurden bivariat ausgeführt und ein p-Wert  $< 0,05$  als statistisch signifikant gewertet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Auswertung des OP-Berichtes

Die präoperative Arthroskopie wurde bei 16 Kniegelenken (89%) der oHTO-Gruppe und 7 Kniegelenken (64%) der cDFO-Gruppe durchgeführt. Bei sehr jungen Patienten wurde bei radiologisch fehlendem Knorpelschaden (MRT) auf die Arthroskopie verzichtet. Dabei stellte sich innerhalb der beiden Gruppen nach der Outerbridge-Klassifikation folgender präoperativer Knorpeldefekt in den jeweiligen Kompartimenten dar (Tabelle 5).

**Tabelle 5: Grad der Chondromalazie**

	Mediales Kompartiment					Laterales Kompartiment				
	CM 0	CM I	CM II	CM III	CM IV	CM 0	CM I	CM II	CM III	CM IV
<b>oHTO</b>	6	1	3	3	3	12	3	0	1	0
<b>cDFO</b>	1	0	3	1	2	4	1	2	0	0

Arthroskopisch konnten in der oHTO-Gruppe in 63% bzw. bei der cDFO-Gruppe in 86% der Fälle eine höhergradige (II-IV) Chondromalazie (CM) im medialen Kompartiment nachgewiesen werden. Im lateralen Kompartiment zeigte sich die CM über die beiden Gruppen bis auf einen Patienten höchstens ein- bis zweitgradig. Bei diesem Patienten bestand eine drittgradige Chondromalazie durch eine lateralseitig gelöste Knorpelschuppe von ca. 30% der Tibiagelenkfläche in Folge einer früheren Tibiakopffraktur. Der Befund führte zur intraoperativen Planungskorrektur mit einer weiterhin varischen Achse und einer Traglinie durch die Mitte des medialen Tibiaplateaus. Zusätzlich wurden in der oHTO-Gruppe bei drei Patienten eine vorangegangene Teil- und bei einem Patienten eine Totalresektion des Innenmeniskus festgestellt. Intraoperative Eingriffe an den Menisken oder am Knorpel wurden nicht durchgeführt.

Die cDFO-Gruppe wies im Durchschnitt mit  $180 \pm 47$  min (min. 125 – max. 268 min) eine um 12 min längere Operationszeit als die oHTO-Gruppe mit  $168 \pm 52$  min (min. 100 – max. 270 min) auf.

Lediglich bei einer oHTO erfolgten zusätzliche operative Maßnahmen in Form eines distalen Versatzes des Fibulaköpfchens zur Aussenbandstraffung und

eines autologen Knochentransplantats bei geplanter 15 mm Aufklappung zur Stabilisierung.

Insgesamt wurden alle Eingriffe im Wesentlichen von einem Operateur geleitet. Als Implantate wurden für die oHTO ausschließlich TomoFix-Platten verwendet. Bei der cDFO fanden in 8 Fällen 95°-Kondylenklingenplatte sowie zwei winkelstabile LISS-Platten und eine winkelstabile NCB-Platte Anwendung.

### **3.2 Klinischer Verlauf und Komplikationen**

Die durchschnittliche Krankenhausliegezeit betrug bei der oHTO-Gruppe  $8 \pm 3$  Tage (min. 5 – max. 14 Tage) und bei der cDFO-Gruppe  $7 \pm 2$  Tage (min. 4 – max. 11 Tage). Mit Beginn der postoperativen Mobilisation an zwei Gehstützen mit 20 kg Teilbelastung konnte die Vollbelastung innerhalb der oHTO-Gruppe mit durchschnittlich  $68 \pm 26$  Tage (min. 27 – max. 124 Tage) genauso früh wie in der cDFO-Gruppe mit  $68 \pm 18$  Tage (min. 34 – max. 92 Tage) erreicht werden. Eine frühzeitigere Vollbelastung als die regelhaft postoperativ angeordneten 6 Wochen bis zur ersten Röntgenkontrolle ist auf die Eigeninitiative des Patienten zurückzuführen. Die ROM des Kniegelenkes zeigte in beiden Gruppen nur unwesentliche Veränderungen. Bei der oHTO-Gruppe erhöhte sich die durchschnittliche ROM (Extension/Flexion) von 0/0/145° auf 0/0/150° und bei der cDFO-Gruppe von 0/0/135° auf 0/0/140°.

Intraoperativ trat bei einer oHTO ein Bruch der lateralen Kortikalis mit geringgradigem Korrekturverlust auf. Bei der cDFO-Gruppe brach die mediale Kortikalis in 6 Fällen jedoch immer ohne Korrekturverlust. Ansonsten wurden keine weiteren intraoperativen Probleme beobachtet. Als häufigste länger anhaltende postoperative Komplikationen stellten sich Schmerzen und Sensibilitätsstörungen im Bereich des Plattenlagers dar (oHTO 7; cDFO 3). Beschwerdelinderung bzw. -freiheit wurde mit der Implantatentfernung erreicht. Des Weiteren trat in der oHTO-Gruppe eine Fußheberschwäche bei bekannter Multiple Sklerose ohne sicher nachweisbarem Peroneusschaden und eine verzögerte Knochenkonsolidierung auf. Beide Probleme waren im Verlauf regredient. Die verzögerte Knochenkonsolidierung als wesentlichste Komplikation konnte durch eine operative Revision mittels autologem Knochentransplantat erfolgreich behandelt werden.



Die Implantatentfernungsrate ist mit 71% bei der oHTO-Gruppe und mit 64% bei der cDFO-Gruppe ähnlich. Der Zeitraum bis zur Entfernung der 12 Implantate in der oHTO-Gruppe dauerte durchschnittlich  $19 \pm 2$  Monate (min. 11 – max. 35 Monate) und für die 7 Implantate in der cDFO-Gruppe durchschnittlich  $18 \pm 2$  Monate (min. 13 – max. 26 Monate). In 58% bzw. 43% der Fälle in der oHTO-Gruppe bzw. cDFO-Gruppe bestand die Indikation zur Implantatentfernung auf Grund der o.g. Irritationen beim Plattenlager. Die verbleibenden Entfernungen führten wir frühestens 12 Monate postoperativ auf Patientenwunsch durch.

Innerhalb des Follow-up Zeitraumes von 55 Monaten bei der oHTO-Gruppe und 41 Monaten bei der cDFO-Gruppe konnten wir keine Revision mittels unikondylärem oder komplettem Gelenkersatz feststellen.

### 3.3 Radiologische Auswertung

Eine Zusammenfassung der radiologischen Ergebnisse beider Gruppen zeigen die beiden nachfolgenden Tabellen.

**Tabelle 6: Radiologische Ergebnisse cDFO-Gruppe**

Fall	präoperativ							postoperativ				
	CM - Grad	MAD mm	HKA °	mechanische Beinachse %	mLDFW °	aPDFW °	Keilhöhe °	MAD mm	HKA °	mechanische Beinachse %	mLDFW °	aPDFW °
1	0	-25,9	-6,7	16,0	91	/	7,7	-13,6	-3,5	30,5	89	/
2	2	-19,6	-4,6	25,8	91	80,4	9	15,8	4,4	70,2	82	82
3	4	-14,6	-3,9	32,6	89	83,6	4	-1,4	-0,3	47,4	86	89,6
4	0	-22,1	-5,4	20,2	91	87,8	8,3	-7,7	-2	37,8	86	85,5
5	0	-13,4	-3,7	20,3	91	84,2	5	-19,7	-6	24,1	89	85,6
6	3	-32,5	-9,2	4,2	91	/	6	-2,8	-0,8	46	84	/
7	0	-49,8	-12,0	-9,8	94	86,8	16	-5,9	-1,8	41,4	86	91,7
8	0	-23,4	-5,8	20,3	93	84,8	7,5	-1,9	0,6	49,4	86	83,2
9	2	-32,5	-15,0	12,8	102	78,3	16,6	7,6	3,8	63	85	102,5
10	2	-11,4	-3,9	32,1	92	84,4	10,1	-3,1	-0,9	41,6	89	89,5
11	4	-23,4	-6,3	13,4	98	83,6	7	-6,9	-1,5	38,8	84	89
<b>MW</b>	<b>/</b>	<b>-24,4</b>	<b>-7,0</b>	<b>18,0</b>	<b>92</b>	<b>83,8</b>	<b>8,8</b>	<b>-3,6</b>	<b>-0,7</b>	<b>44,6</b>	<b>86</b>	<b>88,8</b>
<b>SD</b>	<b>/</b>	<b>3,3</b>	<b>1,1</b>	<b>3,9</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>2,9</b>	<b>0,9</b>	<b>4,0</b>	<b>0,7</b>	<b>2,0</b>

Tabelle 7: Radiologische Ergebnisse oHTO-Gruppe

Fall	präoperativ							postoperativ				
	CM - Grad	MAD mm	HKA °	mechanische Beinachse %	MPTW °	Tibial Slope °	Keilhöhe °	MAD mm	HKA °	mechanische Beinachse %	MPTW°	Tibial Slope °
1	3	-25,4	-7,6	11,6	83	/	11	15,3	4,5	71,4	96	/
2	2	-8,5	-2,8	32,3	89	7,6	7	11,6	3,8	64,2	93	7,1
3	0	-23,0	-6,3	17,5	85	/	6,9	3,2	0,7	53,1	90	/
4	0	-21,3	-5,9	17,2	81	/	5,3	0,9	-0,2	49,0	86	/
5	4	-44,4	-11,2	0,0	85	8,1	13	2,6	0,9	56,0	93	13
6	4	-35,3	-8,5	9,1	82	12,8	6	-14,6	-3,9	32,1	86	14
7	0	-29,0	-8,2	9,3	82	9	7	3,3	0,9	51,3	92	6
8	0	-33,0	-9,5	4,9	81	12,3	8	-10,6	-3,2	33,4	90	12,2
9	0	-30,8	-9,5	2,0	81	11,8	9	3,4	0	51,5	89	10,2
10	0	-28,1	-8,4	8,0	81	7,6	9	-20,6	-7,2	14,6	86	9,4
11	2	-26,0	-8	11,8	86	11,1	9,6	21	6,3	77,7	96	8,5
12	0	-22,4	-5,7	20,5	81	5,9	6	-2,8	-0,8	44,2	87	8,4
13	1	-16,3	-4,5	27,3	84	5,1	7	0,4	0,3	49,2	90	9,0
14	3	-29,7	-7,5	10,4	84	6	9	11,5	3,4	62,0	95	7,1
15	2	-42,6	-12,1	-7,3	82	12,3	5,9	-11,4	-3,9	32,1	88	14,6
16	4	-42,7	-10,8	-2,0	81	3,9	11	-25	-6,8	20,9	87	9,2
17	3	2,7	0,6	52,0	89	11,4	4	13,9	4,1	64,0	94	7,4
<b>MW</b>	<b>/</b>	<b>-26,8</b>	<b>-7,4</b>	<b>13,2</b>	<b>83</b>	<b>8,9</b>	<b>7,9</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	<b>48,2</b>	<b>90</b>	<b>9,7</b>
<b>SD</b>	<b>/</b>	<b>2,9</b>	<b>0,8</b>	<b>3,5</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>3,1</b>	<b>0,9</b>	<b>4,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>

### 3.3.1 MAD und HKA

Durch die valgisierende Operation änderte sich die durchschnittliche MAD zum Kniegelenksmittelpunkt signifikant von  $-26,8 \pm 2,9$  mm auf  $-0,1 \pm 3,1$  mm in der oHTO-Gruppe ( $p < 0,001$ ) und etwas geringer in der cDFO-Gruppe von  $-24,4 \pm 3,3$  mm auf  $-3,6 \pm 2,9$  mm ( $p = 0,004$ ). Dafür beinhaltete die cDFO-Gruppe die ausgeprägtere Fehlstellung mit einer medialen Achsabweichung von 49,8 mm im Vergleich zu der geringsten Abweichung mit medialen 11,4 mm. In der oHTO-Gruppe reichte die präoperative Achsabweichung von medialen 44,4 mm zu lateralen 2,7 mm.

Der HKA präoperativ verlief fast identisch in beiden Gruppen mit  $-7,4 \pm 0,8^\circ$  (min.  $-12,1^\circ$  – max.  $0,6^\circ$ ) in der oHTO-Gruppe und  $-7,0 \pm 1,1$  (min.  $-15,0$  – max.  $-3,7^\circ$ ) in der cDFO-Gruppe. Die durchschnittliche Achskorrektur war in der oHTO-Gruppe mit  $7,3 \pm 0,9^\circ$  (min.  $1,2^\circ$  – max.  $14,3^\circ$ ) größer als in der cDFO-Gruppe mit  $6,2 \pm 1,6^\circ$  (min.  $-2,3^\circ$  – max.  $18,8^\circ$ ). Demzufolge wurde in der oHTO-Gruppe eine neue Beinachse von  $-0,1 \pm 0,9^\circ$  und in der cDFO-Gruppe von  $-0,7 \pm 0,9^\circ$  erreicht (Abbildung 14). Trotz des größeren Korrekturausmaßes zeigte die oHTO-Gruppe mit absoluten  $2,2 \pm 0,5^\circ$  Abweichung von der präoperativen Planung ein minimal präziseres Korrekturergebnis als die cDFO-Gruppe mit  $2,6 \pm 0,7^\circ$  Abweichung. Zudem konnte bei 14 Fällen (82%, davon 9 Fälle  $\leq \pm 1,5^\circ$ ) ein akzeptables Korrekturergebnis mit einer Abweichung von  $\pm 3^\circ$  erreicht werden, in der cDFO-Gruppe dagegen nur in 7 Fällen (64%, davon 4 Fälle  $\leq \pm 1,5^\circ$ ). Beide Gruppen wiesen jeweils eine Überkorrektur sowie zwei (oHTO) und drei (cDFO) Unterkorrekturen auf.

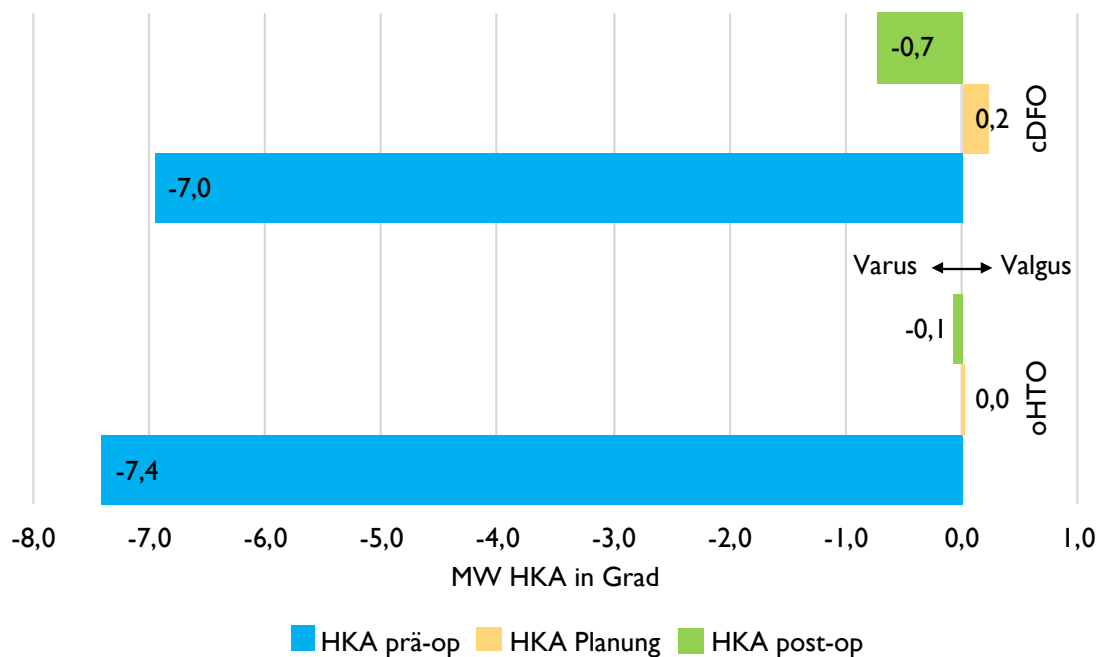


Abbildung 14: Mittelwertveränderung des HKA

### 3.3.2 Mechanische Beinachse

Ein akzeptables Ergebnis der Beinachsenkorrektur lag entsprechend der unter 2.4.4 aufgeführten Definition vor, wenn die neue mechanische Beinachse das Tibiaplateau in einem Zielkorridor von  $\pm 10\%$  zur Planung schneidet. In 13 von 17 Fällen (76%) bildete die oHTO-Gruppe ein akzeptables Korrekturergebnis ab

und wies damit ein deutlich besseres Ergebnis als die cDFO-Gruppe mit 4 von 11 Fällen (36%) auf. Die 4 Fälle der cDFO-Gruppe lagen gleichzeitig im Bereich eines optimalen Korrekturergebnisses mit dem Zielkorridor von  $\pm 5\%$ . In der oHTO-Gruppe konnte hingegen nur bei 5 von 17 Fällen der optimale Zielkorridor erreicht werden. Trotz dessen erreichte die cDFO-Gruppe mit einer durchschnittlichen absoluten Abweichung von  $10,8 \pm 2,5\%$  zur präoperativen Planung ein vergleichbares Ergebnis zur oHTO-Gruppe mit  $10,1 \pm 2,3\%$ . Eine Unter- bzw. Überkorrektur fand sich in der oHTO-Gruppe jeweils in zwei Fällen. Dagegen zeichnete sich in der cDFO-Gruppe eine deutlich zurückhaltendere Korrektur mit 5 unterkorrigierten Fällen im Vergleich zu zwei überkorrigierten Fällen ab (Abbildung 15). Demzufolge änderte sich die mechanische Beinachse in der oHTO-Gruppe durchschnittlich um  $35 \pm 4\%$  (min. 6,6% - max. 65,9%) von  $13,2 \pm 3,5\%$  auf  $48,2 \pm 4,1\%$  und in der cDFO-Gruppe mit  $26,6 \pm 5,6\%$  (min. - 6,2% - max. 51,2%) von  $18,0 \pm 3,9\%$  auf  $44,6 \pm 4,0\%$ .

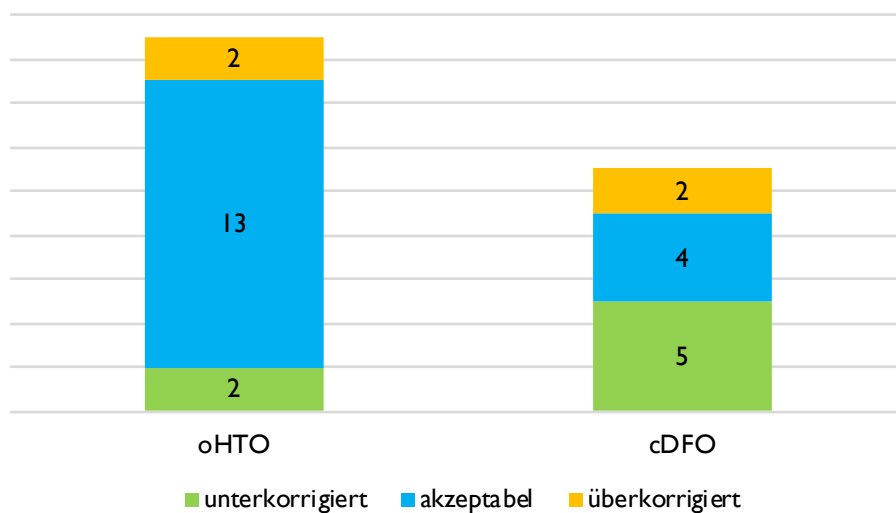
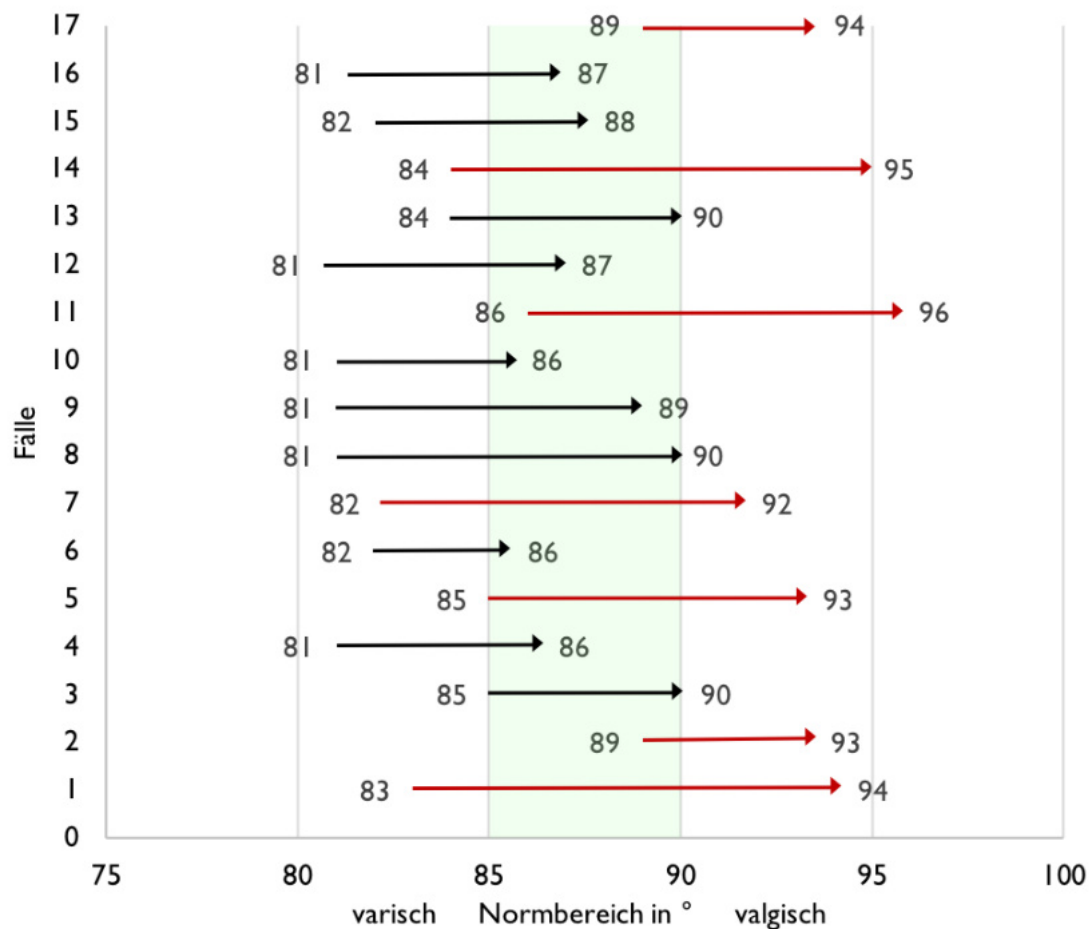


Abbildung 15: Genauigkeit der Beinachsenkorrektur

### 3.3.3 MPTW und mLDFW

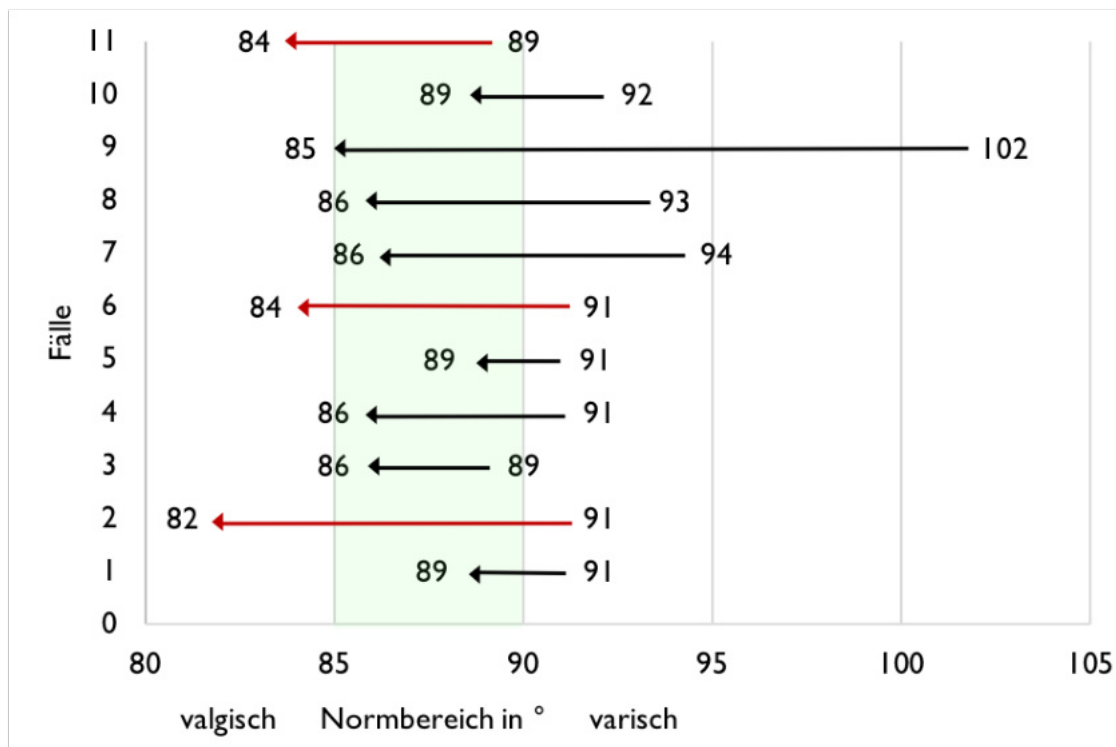
Der MPTW änderte sich durch die aufklappende Tibiaosteotomie im Schnitt von  $83,4 \pm 0,7^\circ$  auf  $90,2 \pm 0,8^\circ$  postoperativ ( $p < 0,001$ ). Dabei erfuhren 7 Fälle (Abbildung 16) eine Überkorrektur mit durchschnittlich  $93,7 \pm 0,5^\circ$  (min.  $91,6^\circ$  – max.  $95,7^\circ$ ), von denen 6 Fälle auf Grund der diagnostizierten Knorpeldefekte geplant waren. Der Fall 7 erhielt eine unbeabsichtigte Überkorrektur von  $2,1^\circ$  zur

Planung. Eine akzeptable postoperative mechanische Beinachse (Zielbereich:  $\pm 10\%$ ) konnte dennoch in 6 von 7 Fällen erreicht werden.



**Abbildung 16: Veränderung des MPTW nach oHTO, Überkorrekturen wurden rot markiert**

Durch die zuklappende Femurosteotomie verringerte sich dagegen der präoperative mLDFW von durchschnittlich  $92,1 \pm 1,0^\circ$  auf  $86,0 \pm 0,7^\circ$  ( $p=0,003$ ). Hierbei unterschritten lediglich drei Fälle (Abbildung 17) die  $85^\circ$ -Grenze mit durchschnittlich  $83,4 \pm 0,6^\circ$  (min.  $82^\circ$  – max.  $84,2^\circ$ ). In diesen drei Fällen war die Überkorrektur des mLDFW aufgrund eines Knorpeldefektes in zwei Fällen präoperativ geplant und wurde im dritten Fall intraoperativ nach Kniearthroskopie angepasst. Im Vergleich zur oHTO-Gruppe konnte nur eine Umstellung den geplanten Akzeptanzbereich von  $\pm 10\%$  erzielen.



**Abbildung 17: Veränderung des mLDFW nach cDFO, Überkorrekturen wurden rot markiert**

Die nachfolgende Tabelle beschreibt das Ergebnis der klinischen Scores zwischen den o.g. 7 bzw. 3 Überkorrekturen beim MPTW sowie dem mLDFW im Vergleich zu den Korrekturen im Normbereich. Hierbei ist ersichtlich, dass die Überkorrekturen einen niedrigeren präoperativen Ausgangswert aufweisen und einen niedrigeren postoperativen Wert erreichen.

**Tabelle 8: Vergleich der klinischen Ergebnisse zwischen überkorrigierten und normwertigen Korrekturen**

		MW SF-36			MW Lysholm-Score	
		n, (%)	präoperativ	postoperativ	präoperativ	postoperativ
oHTO	normal (MPTW ≤ 90°)	10 (56%)	63	79	76	94
	Überkorrektur (MPTW > 90°)	7 (44%)	57	77	69	84
cDFO	normal (mLDTW ≥ 85°)	8 (73%)	64	83	76	97
	Überkorrektur (mLDTW < 85°)	3 (17%)	57	74	59	71

### **3.3.4 JLCA**

Der JLCA nahm in beiden Gruppen postoperativ ab. In der oHTO-Gruppe verringerte sich dieser durchschnittlich von  $-2,1 \pm 0,4^\circ$  auf  $-1,6 \pm 0,3^\circ$  (min.  $1,3^\circ$  - max.  $-3,3^\circ$ ;  $p=0,453$ ) und in der cDFO-Gruppe von  $-2,3 \pm 0,5^\circ$  auf  $-1,9 \pm 0,4^\circ$  (min.  $0,4^\circ$  - max.  $-5,2^\circ$ ;  $p=0,169$ ).

### **3.3.5 $\alpha$ -Winkel**

Die geplante Aufklappung ( $\alpha$ -Winkel) bei der oHTO betrug im Schnitt  $7,9 \pm 0,6^\circ$  (min.  $4^\circ$  - max.  $13^\circ$ ). Dies führte zu einer durchschnittlichen Verlängerung des operierten Beines von  $0,6 \pm 0,2$  mm/ $^\circ$   $\alpha$ -Winkel und einer Gesamtverlängerung im Schnitt von  $4,4 \pm 1,1$  mm. Statt des Aufklappens wurde bei der cDFO ein geplanter Knochenkeil von durchschnittlich  $8,8 \pm 1,2^\circ$  (min.  $4^\circ$  - max.  $17^\circ$ ) entnommen. Dementsprechend verringert sich die Beinlänge durchschnittlich um  $0,6 \pm 0,2$  mm/ $^\circ$   $\alpha$ -Winkel mit einer Gesamtverkürzung von  $4,6 \pm 1,3$  mm.

### **3.3.6 Tibial Slope und aPDFW**

Auf Grund fehlender oder schlechter postoperativer lateraler Aufnahmen konnten bei der Betrachtung des tibialen Slopes 3 Fälle und dem aPDFW 2 Fälle nicht berücksichtigt werden. Die oHTO erhöhte den tibial Slope durchschnittlich um  $0,8 \pm 0,8^\circ$  (min.  $-4,0^\circ$  - max.  $5,3^\circ$ ) von  $8,9 \pm 0,8^\circ$  auf  $9,7 \pm 0,7^\circ$  postoperativ ( $p=0,397$ ). Dagegen veränderte die cDFO den aPDFW stärker mit durchschnittlich  $4,9 \pm 2,6^\circ$  von  $83,8 \pm 1,0^\circ$  auf  $88,8 \pm 2,0^\circ$  postoperativ ( $p=0,058$ ).

### **3.3.7 Patellaposition**

Bei Betrachtung der postoperativen Patellahöhe fiel über alle Indizes beider Gruppen eine Höhenminderung der Patella auf (Tabelle 9). Eine signifikante Veränderung konnte nur bei dem CDI ( $p=0,001$ ) und BPI ( $p<0,05$ ) der oHTO-Gruppe nachgewiesen werden.

**Tabelle 9: Vergleich der prä- und postoperativen Patellahöhe**

	oHTO		cDFO	
	präoperativ	postoperativ	präoperativ	postoperativ
<b>ISI</b>	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,04	0,94 ± 0,07	0,92 ± 0,06
<b>CDI</b>	0,84 ± 0,02	0,74 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,79 ± 0,05	0,80 ± 0,08
<b>BPI</b>	0,77 ± 0,02	0,70 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,74 ± 0,04	0,74 ± 0,03

<sup>a</sup>p<0,05 im Vergleich zu präoperativ

### 3.4 Panfeldmethode

Bei der Bestimmung der Beinachse zeigte die intraoperative Planfeldmethode in 13 von 16 Fällen (81%) eine akzeptable Präzision verglichen zur präoperativen LAiS (< 10% Abweichung). Eine Genauigkeit von unter ± 5% Abweichung erreichten sogar 9 von diesen 13 Fällen. Im Durchschnitt wich die mechanische Beinachse der Planfeldmethode mit  $4,4 \pm 3,3\%$  (min. 0,2% - max. 11,4%) von der präoperativen LAiS ab.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Abweichung der mechanischen Beinachse in der LAiS im Vergleich zur Planfeldmethode im Liegen. Zum einen ist eine bessere Vergleichbarkeit bei einer geringeren Deformität der varischen Beinachse gegeben. Zum anderen verringert sich die Präzision bei Zunahme des Körpergewichtes und bei einer höheren Abweichung des JLCA zwischen LAiS und Planfeld. Die Zentrierung der Patella war in den meisten Aufnahmen (11 von 16 Fällen < 10 mm Abweichung) vergleichbar.



**Tabelle 10: Abweichungen der mechanischen Beinachse zwischen LAiS und Planfeld unter bestimmten Kriterien**

Kriterien	präoperative Abweichung der mechanischen Beinachse		
	≤5%	>5-10%	>10%
<b>Deformität</b>			
> 20% (gering)	5 (100%)	/	/
> 10-20% (mittel)	4 (80%)	/	1 (20%)
≤ 10% (stark)	/	4 (67%)	2 (33%)
<b>JLCA</b>			
Diff. 0°	2 (33%)	3 (50%)	1 (17%)
Diff. 1°	6 (86%)	1 (14%)	/
Diff. 2°	1 (50%)	/	1 (50%)
Diff. > 3°	/	/	1 (100%)
<b>Patella</b>			
Diff. ≤ 5mm	5 (50%)	2 (20%)	3 (30%)
Diff. 5-10mm	2 (50%)	2 (50%)	/
Diff. > 10mm	2 (100%)	/	/
<b>BMI</b>			
Untergewicht	1 (100%)	/	/
Normalgewicht	5 (72%)	1 (14%)	1 (14%)
Übergewicht	3 (43%)	3 (43%)	1 (14%)
adipös	/	/	1 (100%)

### 3.5 Klinische Scores

Von den erhobenen klinischen Scores (SF-36, Lysholm, VAS) konnten bis auf drei Fragebögen (Lysholm-Score und VAS) in der oHTO-Gruppe alle vollständig erfasst und ausgewertet werden.

#### 3.5.1 SF-36

Der SF-36 zeigte für beide Gruppen fast identische Ergebnisse. Ein Jahr nach der Operation konnte in der oHTO-Gruppe eine signifikante Steigerung der Lebensqualität von  $61,3 \pm 4,8$  auf  $78,7 \pm 4,4$  Punkte ( $p < 0,001$ ) und in der cDFO-Gruppe von  $62,6 \pm 6,1$  auf  $80,5 \pm 5,2$  Punkte ( $p = 0,005$ ) erzielt werden. Mit durchschnittlichen  $17,8 \pm 2,6$  Punkten (min. 0 – max. 28 Punkte) erhöhte sich der Score in der cDFO-Gruppe genauso stark wie in der oHTO-Gruppe mit  $17,4 \pm 3,1$  Punkten (min. 2 – max. 52 Punkte).

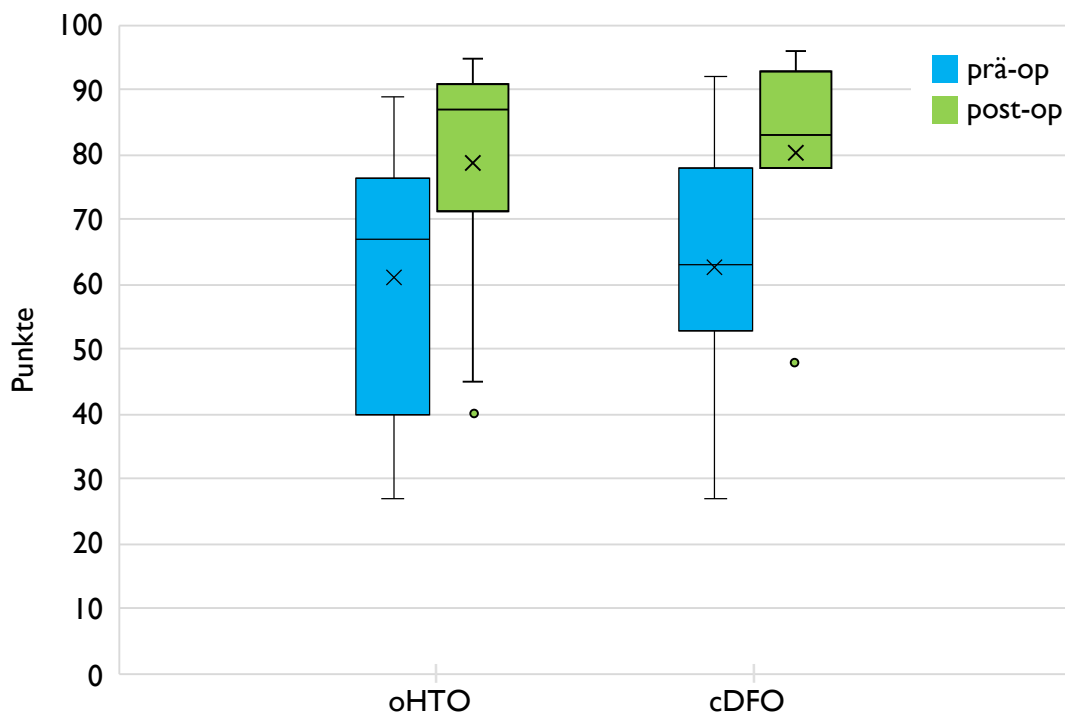


Abbildung 18: Prä- und postoperative Lebensqualität nach SF-36

#### 3.5.2 Lysholm-Score

Das präoperative subjektive Empfinden in der oHTO-Gruppe verbesserte sich im Mittel um  $16,9 \pm 2,0$  Punkte (min. 6 – max. 30 Punkte) von  $73,6 \pm 4,1$  auf  $90,5 \pm 4,1$  Punkte signifikant ( $p = 0,001$ ). Ein entsprechend gutes Ergebnis erzielte auch

die cDFO-Gruppe mit durchschnittlichen  $19,6 \pm 4,5$  Punkten (min. 0 – max. 54 Punkte) und einer signifikanten Erhöhung von  $71,6 \pm 7,7$  auf  $90,2 \pm 5,3$  Punkte ( $p=0,005$ ).

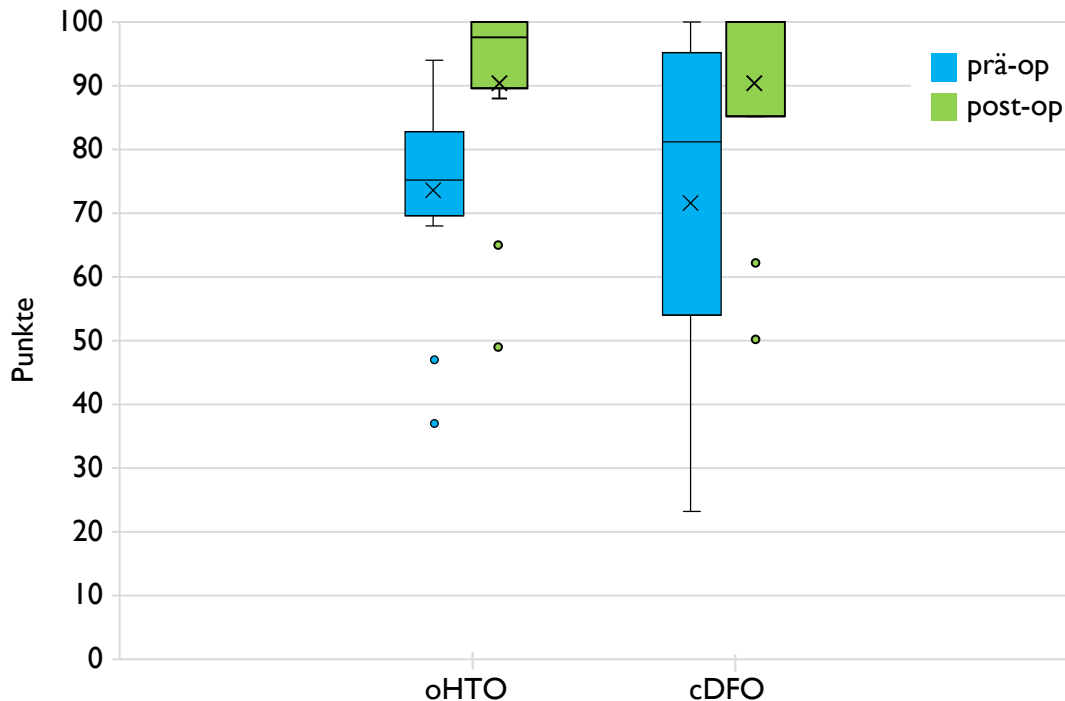
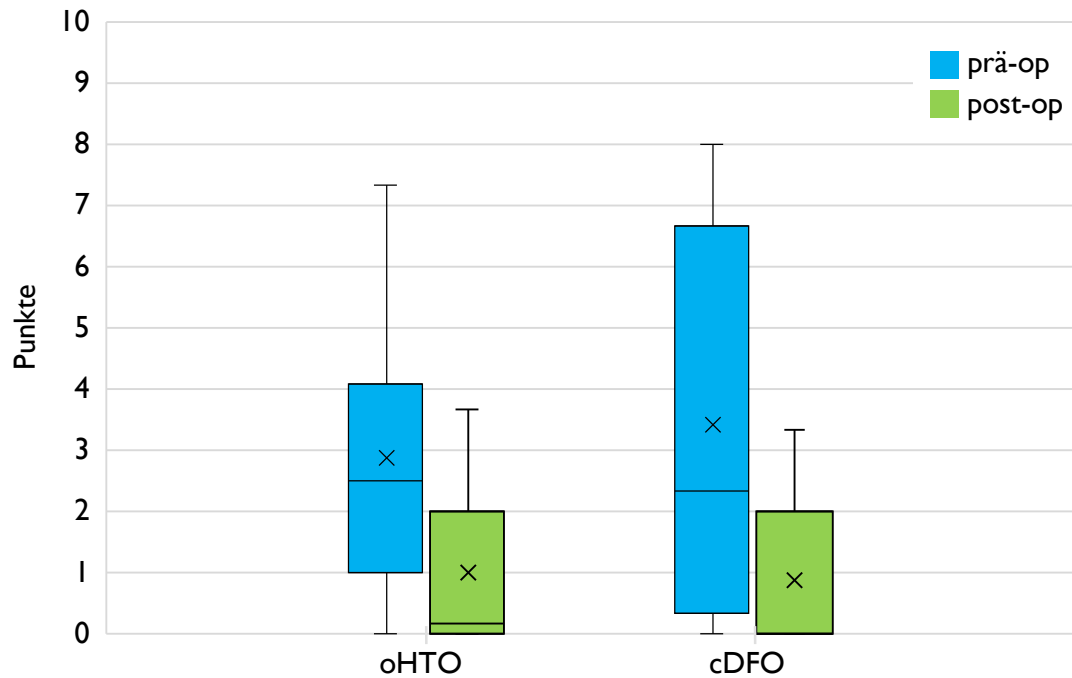


Abbildung 19: Prä- und postoperatives Ergebnis des Lysholm-Scores

### 3.5.3 VAS

Das subjektive Schmerzempfinden konnte in beiden Gruppen auf ein identisches Schmerzniveau gemindert werden. In der oHTO-Gruppe wurden die Schmerzen signifikant von einem präoperativen Wert von  $2,8 \pm 0,5$  Punkten auf  $1 \pm 0,4$  Punkte ( $p=0,003$ ) reduziert. Ausgehend von einem etwas höheren Schmerzniveau von  $3,3 \pm 0,9$  Punkten konnte durch die cDFO eine signifikante Änderung auf  $0,8 \pm 0,4$  ( $p=0,01$ ) Punkte erreicht werden. Somit konnte in der cDFO-Gruppe mit durchschnittlichen  $-2,5 \pm 0,7$  Punkten (min. 0 – max. -7 Punkte) eine geringfügig höhere Schmerzreduktion als in der oHTO-Gruppe mit  $-1,9 \pm 0,5$  Punkten (min 0 – max. -6 Punkte) erzielt werden. Insgesamt gaben bei der Abschlussuntersuchung 7 von 11 Patienten (64%) aus der cDFO-Gruppe und 9 von 14 Patienten aus der oHTO-Gruppe (64%) eine komplette Schmerzf়reiheit an.



**Abbildung 20: Prä- und postoperatives Ergebnis beim subjektiven Schmerzempfinden der VAS**

Insgesamt konnten bei beiden Gruppen überwiegend gute bis sehr gute klinische Ergebnisse (Patienten mit 80-100 Punkten) erzielt werden (Tabelle 11). Des Weiteren war die postoperative Lebensqualität und das funktionelle Ergebnis besser, desto präziser die geplante Achskorrektur mit der Umstellung erreicht wurde. Wobei in der oHTO-Gruppe bei den präziseren Korrekturen im Vergleich zu den Über- und Unterkorrekturen ein niedrigeres Schmerzniveau erzielt wurde. Eine Über- bzw. Unterkorrektur wirkte sich hierbei vor allem in der oHTO-Gruppe deutlich mit einem verminderten Ergebnis von bis zu 21 Punkten beim Lysholm-Score und bis zu 30 Punkten beim SF-36 aus.

**Tabelle 11: Vergleich der Präzision der Achskorrektur mit dem postoperativen klinischen Ergebnis**

	<b>Präzision mechanische Beinachse</b>	<b>Patienten n, (%)</b>	<b>MW mech. Beinachse %</b>	<b>MW SF-36 (Pat. mit 80-100 Pkt. in %)</b>	<b>MW Lysholm- Score (Pat. mit 80-100 Pkt. in %)</b>	<b>MW VAS-Score</b>
<b>oHTO</b>	Optimal (±5%)	5 (29%)	59	82 (60%)	96 (100%)	1
	Akzeptabel (±10%)	8 (47%)	48	85 (88%)	96 (100%)	0
	Unterkorrektur (<-10%)	2 (12%)	18	55 (0%)	78 (50%)	3
	Überkorrektur (>10%)	2 (12%)	55	71 (50%)	75 (50%)	2
	Gesamt	17 (100%)	48	79 (65%)	91 (86%)	1
<b>cDFO</b>	Optimal (±5%)	4(36%)	46	80 (75%)	89 (75%)	1
	Unterkorrektur (<-10%)	5 (46%)	35	82 (80%)	88 (80%)	1
	Überkorrektur (>10%)	2(18%)	67	85 (50%)	100 (100%)	0
	Gesamt	11 (100%)	45	81 (73%)	90 (82%)	1

## 4 Diskussion

In der vorliegenden Studie wurden erstmalig Ergebnisse nach einer oHTO und einer cDFO bei kniegelenksnaher varischer Beindeformität untersucht. Die Analyse beinhaltete eine radiologische Auswertung, eine Evaluierung des Behandlungsverlaufs und die Erhebung klinischer Scores in Form von Fragebögen. Zur radiologischen Analyse der Verfahrensgenauigkeit wurden präoperative LAiS mit postoperativen Vergleichsaufnahmen zum Zeitpunkt der Abschlussuntersuchung verglichen. Als zusätzliche Messinstrumente wurden die individuelle Lebensqualität, das subjektive Befinden, die Funktionalität und das subjektive Schmerzempfinden separat erhoben. Dafür wurden der SF-36 Fragebogen, der Lysholm-Score und die VAS prä- und postoperativ angewendet.

### 4.1 Lokalisierung der Deformität

Umstellungsosteotomien bedürfen zu Beginn einer ausführlichen Analyse der Beingeometrie anhand einer Röntgenstandbeinganzaufnahme (LAiS) zur Bestimmung des Schwerpunkts der Deformität [67]. Innerhalb des Patientenkollektives zeigten sich varische Deformitäten in 61% vorwiegend an der Tibia und in 39% am Femur. Denn eine varische Beinachse ist nicht wie oft angenommen ausschließlich tibialer, sondern auch femoraler Genese [71,88,89]. Demzufolge würde bei femoral bedingter Achsfehlstellung eine oHTO trotz korrekter mechanischer Beinachse zu einer pathologischen Kniegelenksebene mit erhöhten Scherkräften führen [12]. Babis et al. beschreiben die Schiefe der Gelenklinie sogar als prognostischen Faktor für ein gutes postoperatives Ergebnis [88]. Terauchi et al. sehen, dass eine HTO mit präoperativ bestandener distaler Femurdeformität ein schlechteres postoperatives Ergebnis sowie eine sekundäre varische Beinachse begünstigt [110]. Van Raaij et al. widersprechen dieser Aussage, indem sie keine signifikante Korrelation zwischen einer femoral bedingten Achsfehlstellung und einem Therapieversagen der HTO herausfanden. Jedoch wies ihr Patientenkollektiv nur eine geringfügige präoperative Varusausprägung am Femur mit einem mLDFW von  $89,1 \pm 2,1^\circ$  auf [111]. Dagegen zeigten die Patienten in der vorliegenden Studie sowohl in der oHTO-Gruppe mit einem MPTW von  $83,4 \pm 0,7^\circ$  (mLDFW  $89,1 \pm 0,5^\circ$ ) als auch

in der cDFO-Gruppe mit einem mLDFW von  $92,1 \pm 1,0^\circ$  (MPTW  $87,3 \pm 0,8^\circ$ ) eindeutig einen Schwerpunkt der Deformität.

### 4.2 Wahl des optimalen Zielbereiches

Die Wahl des Korrekturausmaßes und der Verlauf der neuen mechanischen Beinachse ist für jeden Patienten individuell zu planen. Bei jungen Patienten mit ausgeprägter Fehlstellung und medialen Beschwerden ohne strukturelle Schädigung der Kniebinnenstrukturen wurde meist eine neue mechanische Beinachse durch den medialen tibialen Interkondylenhöcker geplant. Bei einer medialen Gonarthrose ist die Entlastung der medialen Strukturen mit einer eher valgischen Beinachse Ziel des operativen Eingriffs. Demzufolge betrug in der oHTO-Gruppe postoperativ der durchschnittliche HKA  $-0,1^\circ$  und die mechanische Beinachse 48,2%. Die neue Beinachse in der cDFO-Gruppe fällt dazu mit einem durchschnittlichen HKA von  $-0,7^\circ$  und einer mechanischen Beinachse von 44,6% fast identisch aus.

In einem gesunden Knie beträgt der durchschnittliche HKA zwischen  $-0,97^\circ$  und  $-1,5^\circ$  [32,36,93]. Zahlreiche Autoren sehen bei medialer Gonarthrose eine postoperative Beinkorrektur mit einem HKA von  $3 - 5^\circ$  Valgus oder eine mechanische Beinachse bei 62-66% Weite des Tibiaplateaus als sinnvoll an [47,64,65,70,89]. Dazu abweichend zielten van der Woude et al. bei ihren cDFO auf eine überwiegend neutrale Beinachse zur Entlastung des medialen Kompartimentes [71]. Neuere Studien betrachten zusätzlich das Ausmaß der medialen Chondromalazie und führen eine individuell angepasste Korrektur mit einem moderaten Zielbereich von valgischen  $1,7-5^\circ$  oder 50-65% der gesamten Tibiaplateaubreite unter Vermeidung von Überkorrekturen durch [73,74]. Eine Kniegelenksarthroskopie ist in der gleichen Sitzung zur Überprüfung der Osteotomieindikation und zur intraoperativen Korrekturanpassung nach Art und Ausmaß des Knorpelstatus unerlässlich [74]. Die Wahl des optimalen Zielbereiches ist entscheidend, da eine Unterkorrektur zu einem Wiederauftreten der Deformität führen kann, während eine Überkorrektur eine laterale Gonarthrose begünstigt [47,112]. Letztlich wird die Traglast immer in Richtung lateralem Kompartiment verlagert, was zu einer Entlastung des medialen Kompartiment führt und gleichzeitig die Knorpelregeneration fördert [5].

Die Empfehlungen zum Korrekturausmaß bei medialer Gonarthrose sind jedoch nicht auf unser gesamtes Patientenkollektiv übertragbar, da auch einige junge Patienten ohne strukturellen Schaden korrigiert wurden. Deshalb weichen die beschriebenen Zielwerte von den erwähnten Literaturangaben ab.

### 4.3 Differenzen zwischen beiden Gruppen

Zwischen den beiden Gruppen zeigte sich ein mäßiger Unterschied in der Genauigkeit der Ergebnisse bei der radiologischen Auswertung. In 82% der Fälle innerhalb der oHTO-Gruppe konnte der postoperativ akzeptierte Zielbereich des HKAs von  $\pm 3^\circ$  zur präoperativen Planung im Vergleich zu 64% in der cDFO-Gruppe erreicht werden. Daher war die durchschnittliche absolute Abweichung von der präoperativen Planung bei beiden Gruppen nahezu identisch (oHTO:  $2,2^\circ$ ; cDFO  $2,6^\circ$ ). Bestätigt werden diese Ergebnisse bei Betrachtung der postoperativen mechanischen Beinachse. Bei der oHTO-Gruppe ist diese in 76% der Fälle doppelt so häufig im akzeptierten Zielbereich von  $\pm 10^\circ$  im Vergleich zur präoperativen Planung wie die der cDFO-Gruppe mit 36%. Die durchschnittliche absolute Abweichung von der präoperativen Planung war erneut zwischen beiden Gruppen übereinstimmend (oHTO:  $10,1^\circ$ ; cDFO:  $10,8^\circ$ ). Eine Überkorrektur fand ähnlich häufig (oHTO 12%; cDFO 18%) in beiden Gruppen statt. Die mehrheitlich unterkorrigierten Osteotomien zeigten sich dagegen in 46% der Fälle in der cDFO-Gruppe vergleichend mit 12% in der oHTO-Gruppe. Insgesamt gab es 24% Unter- oder Überkorrekturen in der oHTO-Gruppe und 64% in der cDFO-Gruppe.

Die Genauigkeit der Korrektur zur präoperativ geplanten Zielgröße wird als wesentlicher Faktor in der Bewertung des Operationsergebnis angesehen [113]. Umso erstaunlicher ist es, dass operative Ergebnisse der oHTO teilweise eine überraschend geringe Genauigkeit in Bezug auf die Zielgröße aufweisen. Einige klinische Studien trafen nur in 23% bis 52% der postoperativen Fälle den präoperativ definierten Zielbereich (HKA  $\pm 3^\circ$ ) [114–116]. Brouwer et al. bemängelte in seiner Studie die unzureichende Stabilität der eingesetzten Puddu-Platte zur Aufrechterhaltung der Korrektur, weswegen dieses Implantat nicht mehr standardmäßig verwendet wird [117]. Dagegen zeigten andere Studien sehr präzise Korrekturen. So verglichen Schröter et al. das Outcome bei perioperativer Verwendung eines konventionellen Knochenspreizers samt



Messskala mit einer computer-assistierten Navigation. Mit einer Genauigkeit von 92% waren die postoperativen Ergebnisse der konventionellen Gruppe im Zielbereich ( $HKA \pm 3^\circ$ ) und übertrafen sogar das besser erwartete Ergebnis der computer-assistierten Navigation mit 89% [118]. Andere Studien beschreiben jedoch die Computernavigation als genauere Methode [115,119,120].

Die Raten an Über- und Unterkorrekturen werden mit 2% bis 38% bzw. 0% bis 27% angegeben. Die Häufigkeit fehlerhafter Korrekturen wird mit 8% bis 61% beschrieben [113,115,120–122]. Damit lässt sich das Ergebnis der Korrekturgenauigkeit der oHTO-Gruppe aus der vorliegenden Studie vergleichend mit bisher veröffentlichten Studien im vorderen Drittel einordnen. Hinsichtlich der deutlich weniger häufig durchgeführten cDFO gibt es derzeit in der Literatur keine beschriebenen Ergebnisse der Korrekturgenauigkeit. Aktuell befassen sich lediglich zwei Studien mit der varisierenden cDFO ohne Evaluierung der Genauigkeit [71,89]. Ein Literaturvergleich ist somit nicht möglich und dies unterstreicht die Relevanz der vorliegenden Studie trotz der geringen Fallzahl.

Eine mögliche Erklärung der Unterschiede zwischen beiden Gruppen könnte die technisch anspruchsvollere schließende Keilosteotomie sein, da sich hierbei der Operateur auf die Genauigkeit der Knochenresektion verlassen muss und eine intraoperative Nachjustierung nur in geringem Maße möglich ist [71,91]. Ein sekundärer Korrekturverlust ist nach Bruch der lateralen oder medialen Kortikalisbrücke (sog. Hinge) möglich [123]. In den Studiengruppen trat dies bei 6% (oHTO-Gruppe) und 45% (cDFO-Gruppe) ein. Eine zusätzliche Fixierung zur Stabilisierung wurde nicht durchgeführt. Van der Woude et. al beschreiben einen Bruch der medialen Kortikalis in 50% der Fälle bei der cDFO (8 von 16 Fälle) ohne sekundäre Dislokation. Zur Stabilisierung wurde eine Zugschraube und bei besonders kräftig ausgeprägten Beinmuskeln zusätzlich eine mediale Klammer eingeführt. In 6 von 8 Fällen fiel dabei ein  $\alpha$ -Winkel größer  $8^\circ$  auf [71]. Denn je größer der Osteotomiekeil, desto höher ist das Risiko die Plastizitätsgrenze des kortikalen Knochens zu erreichen und damit einen Bruch zu provozieren [124]. Die Frakturrate der lateralen Kortikalis bei der oHTO wird mit 11% bis 35% angegeben [117]. Die Stabilität hängt dann vom verwendeten Implantattyp ab. Bei Verwendung der TomoFix-Platte wird meist keine zusätzliche Fixierung

benötigt. Alternativ kann eine zusätzliche Spongiosaplastik erwogen werden [125].

Ein weiterer Fehler bei der Ausrichtung und Bestimmung der Beinachse kann auch auf eine Instabilität des Kniegelenks zurückzuführen sein [126]. Da beide chirurgischen Verfahren sowie deren intraoperative Assessments bei Patienten in Rückenlage unter nicht belasteten Bedingungen durchgeführt werden, entstehen Differenzen zwischen der intraoperativen Bestimmung (Planfeld) und der prä- und postoperativ erhobenen Beinachse mittels LAiS unter Belastung [121,127]. Diese Differenz wird mit zunehmender Instabilität des Kniegelenkes deutlich verstärkt. In einer vergleichenden Untersuchung der unterschiedlichen Beinachsbestimmung wird eine signifikant häufigere Abweichung größer 10 mm zwischen den jeweiligen Aufnahmen bei zunehmendem JLCA unter Belastung gesehen [128]. Nach einer aktuellen Studie von Lee et al. geht ein größerer Unterschied zwischen dem prä- und postoperativen JLCA mit einer stärkeren Überkorrektur der unteren Extremitäten einher, was auf eine Korrelation zwischen JLCA und Korrekturfehlern schließen lässt [122]. In der vorliegenden Studie verringerte sich die Übereinstimmung der mechanischen Beinachse zwischen präoperativer LAiS und intraoperativer Planfeldkontrolle mit zunehmender Abweichung des JLCA und stützt damit die vorherigen Aussagen.

Darüber hinaus spielt bei der LAiS neben der zentral positionierten Patella auch die möglichst seitengleiche Belastung mit kompletter Streckung eine entscheidende Rolle. Swanson et al. beschreiben, dass eine Rotation der Extremität um 10° Innen- oder Aussenrotation eine statistisch signifikante Auswirkung auf den HKA bei ausgeprägter Valgus- oder Varusdeformität hat [129]. Krackow et al. analysierten den Einfluss von Flexion und Rotation auf die Varus- und Valgusdeformität mit Hilfe eines mathematischen Modells. Eine Erhöhung der Rotation und Flexion von 10° auf 20° wirkte sich signifikant auf den HKA mit einer Erhöhung der Abweichung von 2° auf bis zu 7,4° aus [130]. Ähnlich sehen es auch Brower et al. und Kannan et al., indem sie nicht den einzelnen Ausrichtungsfehler sondern die Kombination aus Rotation und Flexion als Ursache für eine signifikante Veränderung der projizierten Winkel sehen [131,132].

Neben der präoperativen LAiS ist für die Genauigkeit der Umstellungsosteotomie die Erfahrung des Operateurs und die intraoperative Visualisierung der Beinachse entscheidend [133]. Bei den untersuchten Operationen war Dr. Peter Thaller als Leiter der 3D-Chirurgie für die Operation verantwortlich. Zur intraoperativen Achskontrolle nutzten wir ein aus Glasfaser verstärktes gefertigtes Planfeld mit verschiedenen röntgendichten Drahtlinien, um so mit Hilfe fluoroskopischer Bilder die Beinachse während des Eingriffes darstellen zu können. Im Durchschnitt wich die mechanische Beinachse der Planfeldmethode von der präoperativ mittels LAiS bestimmten Beinachse 4,5% der Tibiaweite ab. Bei 82% der Fälle konnte eine akzeptable Vergleichbarkeit mit einer Abweichung von unter  $\pm 10\%$  der intraoperativen Beinachse zur präoperativen LAiS beobachtet werden. Eine erhöhte Abweichung zwischen LAiS und Planfeld konnten wir bei Zunahme des Körpergewichtes, pathologischer Instabilität des Kniegelenkes ( $JLCA \geq 3^\circ$ ) und erheblichen varischen Deformitäten beobachten. In der Literatur sind verschiedene Möglichkeiten der intraoperativen Achskontrolle abgebildet, zu denen das Axis-board, die Kabel-Methode, der Metallstab, die Lasermethode und die computer-assistierte Navigation gehören [128,134–137]. Jang et al. verglichen in 59 biplanaren oHTO präoperativ die LAiS mit der intraoperativen Fluoroskopie mittels Metallstabmethode und erhielten eine durchschnittliche Abweichung bei der mechanischen Beinachse von 4,9% [135]. Dagegen untersuchten Sabharwal und Zhao in ihrer Studie mit 102 Aufnahmepaaren die Genauigkeit der Kabelmethode unter Fluoroskopie zur Bestimmung der intraoperativen MAD. Die Abweichung zwischen intra- und postoperativer LAiS im Verlauf betrug 13,4 mm [128]. Zudem beschreiben sie ebenso eine größer werdende Ungenauigkeit bei Patienten mit hohem BMI und JLCA sowie ausgeprägten Deformitäten. Eine ähnliche Methode zum Planfeld präsentierte Liodakis et al. mit dem sog. „Axis-board“ bei 38 Patienten. Die mittlere Abweichung zur LAiS betrug 2,9 mm [134]. Als gänzlich neuer Ansatz ist die von Nael et al. vorgestellte Lasermethode in einer Kadaverstudie zu sehen. Dabei wird eine laseremittierende und laserauffangende Vorrichtung unter Bildwandlerkontrolle auf den Hüftkopf und dem OSG positioniert sowie zentriert. Der erzeugte kontinuierliche Laserstrahl markiert dann die tatsächliche mechanische Achse, die eine Abweichung von 3,74% zur computer-assistierte Navigation aufwies [136]. Als aufwendigste und genaueste intraoperative

Achskontrolle gilt die computer-assistierte Navigation mit einer Präzision von bis zu 96% [118,119]. Neuere Studien beschreiben den größeren Nutzen bei präoperativ ausgeprägten Varusdeformitäten (mechanische Beinachse  $< 20\%$ ) zur Minimierung von postoperativen Ausreißern [120,138]. Die vorgestellte intraoperative fluoroskopische Planfeld-Methode ist ein valides Instrument zur Beurteilung der Beinachse mit vergleichbaren Ergebnissen zu den hier beschriebenen Alternativen. Für die Anwendung sprechen die geringen Kosten, die Praktikabilität und die gute Zuverlässigkeit. Im Gegensatz zu der computer-assistierten Navigation bzw. der Lasermethode, bei denen die Genauigkeit von der Stabilität der Referenzbasen abhängt, und der Kabeltechnik, bei der es auf gleichbleibende Spannung und die Positionierung ankommt, ist das Planfeld unter der sterilen Abdeckung stabil und durch die Positionierung des Beins auf den Referenzlinien können gute Ergebnisse erzielt werden. Nachteil des Planfeldes ist dagegen die fehlende Echtzeitbeurteilung der Achse in der Sagittal- und Transversalebene.

### 4.4 Komplikationen

Eine allgemein akzeptierte Definition was bei korrigierenden Osteotomien als Komplikation gewertet wird liegt nicht vor. Ein Vergleich mit bestehenden Literaturdaten ist deshalb nur eingeschränkt möglich. Deshalb werden unterschiedlich häufig Komplikationen bei der oHTO von 6% bis 37% angegeben. Daten bei cDFO liegen nur bei einer Studie mit einer Komplikationsrate von 50% vor [71,102]. Zum Vergleich zeigen varisierende medial schließende und lateral öffnende supracondyläre Femurosteotomien Komplikationen von 0 bis 30% bzw. 0 bis 73% [139–141]. In der Literatur sind für die oHTO als wesentlich publizierte Komplikationen die Pseudarthrose (0-5,4%), die allgemeinen Infektionen (0,5-13%) sowie die vaskulären Ereignisse ( $< 2\%$ ) beschrieben [83,102,142]. Im vorliegenden Kollektiv ist eine Pseudarthrose in der oHTO-Gruppe als schwerwiegende Komplikation in der Studie aufgetreten. Am häufigsten zeigten sich postoperativ implantatassoziierte Weichteilirritationen und Schmerzen (oHTO 7 (41%); cDFO 3 (27%)). Durch eine Entfernung des Implantats konnten diese Symptome bei allen Fällen beseitigt werden. Eine ähnliche Irritationsrate bei der oHTO beschrieben auch Niemeyer et al. mit 41% [143]. Wobei die Bandbreite in der Literatur von 0 bis 41% reicht [102,142–144]. Van der Woude

et al. beobachteten mit 44% ebenfalls eine höhere Rate an Weichteilirritationen nach einer cDFO [71]. Als intraoperative Probleme traten bei 6% (1 von 17 Fällen) in der oHTO-Gruppe und bei 45% (5 von 11 Fällen) in der cDFO-Gruppe laterale bzw. mediale Kortikalisbrüche auf. Wobei nur bei der oHTO bei einem Patienten hierdurch ein geringfügiger sekundärer Korrekturverlust beobachtet wurde. Diese Ergebnisse stimmen weitgehend mit in der Literatur beschriebenen Häufigkeiten von 50% bei der cDFO (8 von 16 Fällen) und mit 11% bis 35% bei der oHTO überein [71,117].

Insgesamt bewegen sich die erhobenen Angaben im Rahmen der bisher publizierten Studien. Beide Verfahren sind komplikationsarm und zeigen selten schwerwiegende Komplikationen.

### **4.5 Unbeabsichtigte Veränderungen**

In der Analyse der seitlichen Röntgenbilder des Kniegelenks konnten wir in unterschiedlichem Ausmaß eine unbeabsichtigte Veränderung der postoperativen Patellahöhe, des tibialen Slopes sowie des aPDFW beobachten. Die Patellahöhe minderte sich durchschnittlich über alle Indizes beider Gruppen, wobei nur bei dem CDI und BPI der oHTO-Gruppe eine signifikante Veränderung ersichtlich war. Der tibiale Slope erhöhte sich durchschnittlich um  $0,8^\circ$  auf dann im Mittel  $9,7^\circ$  postoperativ. In der Literatur ist bei einer oHTO eine abnehmende Patellahöhe und ein zunehmender tibialer Slope nachgewiesen [145–147]. Kontrovers scheinen dagegen die Ergebnisse der angewandten Patellaindizes und deren Einflussfaktoren. Der BPI und der CDI werden hauptsächlich durch den Slope beeinflusst. Dagegen spielt beim ISI vornehmlich die Veränderung der Patellasehnenlänge eine Rolle [148]. Diese kann sich im Rahmen postoperativer Immobilisation mit Quadrizepsatrophie, Fibrosierung und Vernarbung der Sehne und des umliegenden Weichteilgewebes an der Osteotomiestelle verkürzen [149,150]. Ein Tiefertreten der Patella nach valgisierenden cDFO ist in der Literatur nicht beschrieben.

Im Vergleich zu der vorliegenden Studie weisen die publizierten Ergebnisse zum tibialen Slope eine durchschnittliche Steigerung von  $2^\circ$  postoperativ auf [151]. Die unerwünschte Erhöhung des tibialen Slopes bei oHTO entsteht am ehesten auf Grund der technisch anspruchsvollen gleichmäßigen Eröffnung des

anterioren und posterioren Osteotomiespaltes sowie dessen Fixierung, die durch den minimalinvasiven Zugang und der besonderen proximalen Tibiaanatomie erschwert wird. LaPrade et al. fanden heraus, dass eine posteromediale gegenüber einer anteromedialen Plattenlage eine Steigerung des tibialen Slopes im Mittel von  $4,3^\circ$  auf ca.  $1^\circ$  reduziert [146]. Dagegen konnten Chae et al. eine Veränderung verhindern, in dem das Öffnungsverhältnis vom anterioren zum posterioren Osteotomiespalt 2:3 beträgt und mit einem Knochentransplantat zusätzlich zur Platteosteosynthese unterstützt wurde [152]. Klinische und in-vivo Studien deuten darauf hin, dass die vermehrte Abkipfung des tibialen Slopes die Belastung für das vordere Kreuzband erhöhen [153,154]. Da es sich in der vorliegenden Studie im Mittel nur um eine Zunahme von  $0,8^\circ$  handelt, scheint in unserem Kollektiv dieser Effekt vernachlässigbar zu sein.

Dagegen beeinflusste die cDFO den aPDFW deutlich mehr mit durchschnittlichen  $5,3 \pm 2,4^\circ$  von  $83,9 \pm 0,9^\circ$  auf  $89,2 \pm 1,9^\circ$  postoperativ. Funktionell kann dies zu einer vermehrten Streckung bzw. Überstreckung im Kniegelenk führen [31]. Klinisch konnte jedoch in diesem Studienkollektiv postoperativ keine relevante Veränderung des Bewegungsumfanges im Kniegelenk festgestellt werden.

Beide Umstellungsosteotomien zeigten zusätzlich einen Einfluss auf die Beinlänge. Im Schnitt verlängerte sich die Gesamtlänge des Beines bei der oHTO um 4,4 mm mit durchschnittlichen 0,6 mm pro Grad Korrekturwinkel ( $\alpha$ -Winkels). Im Vergleich dazu verringerte sich die Gesamtbeinlänge bei der cDFO um 5 mm bei durchschnittlichen 0,6 mm pro Grad  $\alpha$ -Winkel. Dementsprechend kann die Art der Osteotomie eine bestehende präoperative Beinlängendifferenz verstärken oder vermindern. Dieser Umstand sollte bei der präoperativen Planung berücksichtigt werden. Eine Verlängerung der Beinlänge bei einer oHTO bestätigen auch die aktuellen Studien von Kim et al. sowie das Review von Kim et al. mit einer durchschnittlichen Erhöhung von 7,6 mm [155,156].

### **4.6 Klinische Ergebnisse**

Insgesamt konnten die mittelfristigen klinischen Ergebnisse aus den Fragebögen der beiden Gruppen überwiegend mit guten bis sehr guten Bewertungen (80-100 Punkte) überzeugen (oHTO: Lysholm-Score 86%, SF-36 65%; cDFO: Lysholm-

Score 82%, SF-36 73%). Die oHTO-Gruppe verbesserte sich hierbei signifikant in allen Scores: beim SF-36 von 61 auf 79 Punkte, beim Lysholm-Score von 74 auf 91 Punkte und bei der VAS von 3 auf 1 Punkt. Wobei sich vor allem bei den Umstellungen mit einer präziseren mechanischen Beinachse ein besseres postoperatives klinisches Ergebnis einstellte (siehe Tabelle 11). Fast identische, ebenfalls signifikante Verbesserungen zeigen sich in der cDFO-Gruppe mit einer Steigerung beim SF-36 von 63 auf 81, beim Lysholm-Score von 72 auf 90 Punkte und eine Reduzierung bei der VAS von 3 auf 1 Punkt. Ein Zusammenhang zur Präzision war jedoch nicht vorhanden (siehe Tabelle 11).

Knieschmerzen mit einhergehender Aktivitätseinschränkung waren für die Patienten ein bedeutender Grund zur Durchführung der Umstellungsosteotomie. Die Schmerzreduktion betrug im Mittel 2 Punkte auf der VAS zum Ende des Nachbeobachtungszeitraums. Zudem konnte in beiden Gruppen eine Schmerzfreiheit bei 64% der Studienteilnehmer erreicht werden. Auffällig war in der oHTO-Gruppe der höhere postoperative Schmerz bei Über- oder Unterkorrekturen. Nach der Umstellung war eine Teilnahme am täglichen Leben, sowie im beruflichen Alltag wieder uneingeschränkt möglich. Zudem war eine Rückkehr zu der früheren sportlichen Leistungsfähigkeit (z.B. Wandern, Laufen, Radfahren, Fitness, Schwimmen oder mit den Kindern spielen) teilweise oder vollumfänglich möglich.

Ein Vergleich zu früheren klinischen Studien mit mittel- oder langfristigen Ergebnissen erweist sich als schwierig, da teilweise andere Operationstechniken (cHTO, ggf. Knochenersatzmaterial) oder Begleiteingriffe (vordere Kreuzbandplastik oder Knorpelrekonstruktion) durchgeführt wurden. Zudem kamen andere Implantate (z.B. Puddu-Platte oder Otis-C-plus-Platte) und andere klinische Scores (z.B. International Knee Documentation Committee, Oxford Knee Score oder Hospital of Special Surgery Knee Score) zum Einsatz. Weiterhin sind in den Studien die Patientenpopulationen unterschiedlich, wodurch Vergleiche ebenfalls nur eingeschränkt möglich sind.

In der Literatur werden bei Nachuntersuchungen innerhalb der ersten 5 Jahre nach einer oHTO Werte mit 69 bis 96 Punkten beim Lysholm-Score erreicht [157–161]. Eine postoperative Verbesserung des SF-36 mit Werten von 73 bis 89 Punkten wird mehrfach beschrieben [157,159,161,162]. Eine Schmerzlinderung

ist postoperativ ebenfalls mit einer Reduktion von durchschnittlich 2 Punkten auf der VAS beschrieben worden [157,163]. Einzig die Studie von van der Woude et al. untersuchte das klinische Ergebnis nach einer cDFO. Wobei für den Lysholm-Score kein präoperativer Wert sondern nur ein postoperativer Wert mit 73 Punkten erhoben wurde. Zusätzlich ergab sich postoperativ ein Schmerzniveau von 3 Punkten auf der VAS. Im Vergleich dazu zeigen die Patienten in dem vorliegenden Studienkollektiv postoperativ einen um 17 Punkte höheren Lysholm-Score und ein um 2 Punkte geringeres Schmerzniveau. Auch bei der oHTO-Gruppe sind die Ergebnisse im eigenen Patientenkollektiv im Literaturvergleich als gut anzusehen.

Schuster et al. wiesen bei ihren Patienten mit Überkorrektur (MPTW > 95°, 15 von 79 Fällen) nach einer oHTO mittels TomoFix-Platte ein schlechteres funktionelles Langzeitergebnis im IKCD im Vergleich zu den anderen Patienten auf. Ein Einfluss auf die 10-Jahres-Überlebensrate mit dann Konversion auf eine Endoprothese bestand nicht [164]. Holschen et al. definieren eine Überkorrektur bereits ab einem MPTW von größer 93°, da nach Meinung der Autoren die schräge Kniegelenksebene zu einer rascheren Dekompensation des Kniegelenks führen kann [165]. Die jeweils 7 bzw. 3 Überkorrekturen beim MPTW (> 90°) sowie LDFW (< 85°) in unseren Studiensubgruppen wurden auf Grund fortgeschrittener Kniegelenksarthrose zur Vermeidung einer bifokalen Umstellungsosteotomie und damit einhergehender höherer traumatischer Belastung toleriert, sofern der Zielwert (Verlauf der neuen mechanische Beinachse) erreicht werden konnte. Im Vergleich mit den normwertig korrigierten Osteotomien konnte postoperativ eine niedrigere Lebensqualität und funktionelles Outcome beobachtet werden. Der präoperative schlechte Ausgangswert war allerdings am ehesten bedingt durch eine ausgeprägtere Gonarthrose ebenfalls niedriger. Dementsprechend muss auch die relative Veränderung der klinischen Scores bei der Gesamtbetrachtung miteinbezogen werden. Überkorrekturen weisen eine mit 2 bis 9 Punkten (außer oHTO) geringere Scoreverbesserung auf (siehe Tabelle 8). Die Ergebnisse sind vergleichbar mit der o.g. Studie von Schuster et al. [164]. Unsere Ergebnisse zeigen, dass nicht nur der postoperative Wert in die Analysen einfließen sollte, sondern ebenfalls der Ausgangsstatus, um die relative Veränderung erheben zu können.



Wie in der vorliegenden Studie beschreiben auch Ekhtiari et. al. eine mögliche Wiedererlangung der sportlichen Leistungsfähigkeit und der beruflichen Tätigkeit nach einer oHTO in ihrem Review-Artikel. Nach ihren Ergebnissen konnten in 10 Studien 90% der Patienten in den aktiven Sport zurückkehren. Davon erreichten 85% das alte oder sogar ein höheres Leistungspotential. Den Wiedereinstieg in den Beruf schafften zusammengefasst in 4 Studien mit 82% ähnlich viele Patienten. Im Vergleich zur sportlichen Aktivität konnten nur 63% das alte oder ein besseres Arbeitsvermögen erzielen [11]. Dabei scheint die Motivation ein bedeutender Faktor zu sein, um ein höheres Aktivitätsniveau zu erreichen. Bonning et al. beschreiben, dass Patienten mit einer stärkeren Motivation in 66% der Fälle im Gegensatz zu unmotivierten Patienten in 23% der Fälle ein höheres Aktivitätsniveau nach einer oHTO erreichen [10]. In der Studie von Faschingbauer et al. konnten die Patienten mit postoperativ reduzierten Kniebeschmerzen und verbesserter Kniefunktion ihre sportliche Aktivität beibehalten, aber nicht wesentlich erhöhen [158].

Im Vergleich zur Literatur konnte durch die Achsumstellung mit beiden Osteotomieverfahren in den Studiensubgruppen mittelfristig eine deutlich verbesserte klinische Funktion und Lebensqualität erreicht werden.

### **4.7 Vergleich zum Kniegelenkersatz**

Eine Alternative zur Umstellungsosteotomie stellen die mediale unikondyläre Schlittenprothese (MUS) und die totale Knieendoprothese (TK) dar. Tuncay et al. konnten in ihrer Studie mit 106 Fällen MUS eine Steigerung des SF-36 von 33 auf 86 Punkten postoperativ beobachten [166]. Ein ähnlich gutes Ergebnis bei 183 MUS zeigte Krych et al. durch eine Verbesserung des Lysholm-Scores von 71 auf 93 Punkte [167]. Eine Rückkehr zum Sport beschreiben Waldstein et al. in ihrem Review mit 80% bis 93% der Patienten. Schwerpunktmäßig wurden v.a. Sportarten mit geringer (Radfahren, Schwimmen) anstatt hoher Belastung (Ski, Ballspiele) präferiert [9]. Ho et al. zeigten, dass nach einer MUS auch ein höheres Aktivitätsniveau (78%) als vor der Operation möglich ist [168]. Eine Rückkehr in den Beruf ist in über 83% möglich [169]. In der Literatur sind die Angaben für die Rückkehr zur Arbeit und zum Sport nach einer TK mit 36% bis 89% sehr variabel. Sowohl für die Arbeit als auch für den Sport kehrten die Patienten vornehmlich zu einer Aktivität mit geringerer körperlicher Belastung zurück [170]. In der Studie

von Bonnin et al. konnten die Patienten nach einer TK zu 27% das gleiche und zu 42% ein höheres Aktivitätsniveau erreichen. Eine Abnahme der körperlichen Aktivität bestand in 31% der Fälle [171]. Kuijer et al. beobachteten die Wiederaufnahme eines weniger anstrengenden oder gleichen Berufs in 89% der Fälle [172]. Im Hinblick auf die Standzeiten der einzelnen Behandlungsoptionen divergieren diese erst merklich bei einem Follow-up von 10 Jahren. Davor sind die 5 Jahres-Standzeiten bei der oHTO 90-99% und bei der cDFO 94% ohne wesentlichen Unterschiede im Vergleich zum Gelenkersatz [11,71]. Bei einer Standzeit von 10 Jahren sinkt die Rate bei der oHTO auf 64-92%, wohingegen die MUS 84-94% und die TK 92-100% aufweisen [166,173]. Ein längeres Follow-up für die cDFO ist in der Literatur aktuell nicht beschrieben.

Abschließend können die oHTO oder die cDFO verglichen zum endoprothetischen Ersatz als eine adäquate Behandlungsoption bei medialer Varusgonarthrose gesehen werden. Zumal im weiteren Verlauf der endoprothetische Kniegelenkersatz immer noch ohne Einschränkung oder schlechtere Ergebnisse möglich ist [174,175].

### **4.8 Limitationen der Studie**

Der Studienaufbau bietet mehrere inhärente Limitationen, die bei der Betrachtung der Ergebnisse miteinbezogen und bei nachfolgenden Studien berücksichtigt werden sollten. Das Patientenkollektiv war innerhalb (z.B. Deformitäts- oder Mobilitätsgrad) und zwischen den Gruppen (z.B. Alter, Geschlecht oder Gewicht) inhomogen und die Fallzahlen gering. Eine weitere Einschränkung ist das Follow up, da mit den gezeigten Ergebnissen nur Aussagen über den mittelfristigen klinischen Verlauf nach Umstellungsosteotomie getroffen werden können. Die Erhebung der klinischen Scores geschah nicht immer zum exakt gleichen Zeitpunkt. Hierdurch können Abweichungen vor allem bei klinischen subjektiven Fragebögen auftreten. Zudem war eine Messung der Leistungsfähigkeit im Beruf und im Sport mit den enthaltenden Fragebögen nur bedingt möglich.

### 4.9 Ausblick

In Zukunft sollte bei Umstellungsosteotomien vermehrt Wert darauf gelegt werden, die Deformität dort zu korrigieren, wo sie entsteht. Denn auch varische Fehlstellungen können femoral bedingt sein, was in unserem Patientenkollektiv gut dargestellt wird. Zudem kann mit einer cDFO verglichen mit der oHTO auch ein gutes radiologisches sowie klinisches Outcome erzielt werden. Jedoch sollte gerade bei der oHTO eine ungewollte Veränderung der Anatomie in der Sagittalebene vermieden werden.

Zusätzlich sollten wissenschaftliche Untersuchungen der Umstellungsosteotomien die Wiedererlangung bzw. Verbesserung der Teilnahme am Alltag, dem Beruf und der sportlichen Aktivität durch Fragebögen oder Funktionstests mehr berücksichtigt werden. Des Weiteren ist eine gute Dokumentation mit radiologischer und klinischer Evaluation ähnlich wie in dieser Studie beschrieben wichtig. So können in Zukunft weitere wichtige Erkenntnisse mit längerem Beobachtungszeitraum und größerem Patientenkollektiv zur weiteren Verbesserung dieser Therapieverfahren geliefert werden. Da es gerade bei der femoralen Korrektur nur geringe Fallzahlen gibt, stellt ein Osteotomie-Register wie von der Deutschen Kniegesellschaft (DKG) initiiert, ein wichtiges Hilfsmittel zur Verbesserung der klinischen Forschung dar.

## 5 Zusammenfassung

Eine varische Beindeformität, die eine Kniegelenksarthrose verursachen kann, ist nicht wie oft beschrieben ausschließlich tibialer, sondern auch femoraler Genese. Eine Missachtung der femoral bedingten Achsfehlstellung kann trotz korrekter mechanischer Beinachse nach einer oHTO an der Tibia zu einer pathologischen Kniegelenksebene mit erhöhten Scherkräften und weiterer Gelenkdestruktion führen. Dementsprechend war es das Ziel dieser Studie, erstmalig die radiologischen und klinischen Ergebnisse bei einer oHTO und vor allem nach der cDFO bei varischen Beindeformitäten zu untersuchen.

Zwischen den Jahren 2009 bis 2017 konnten 25 Patienten mit 28 valgisierenden Umstellungsosteotomien (17 oHTO, 11 cDFO) in diese Studie eingeschlossen werden. Die Analyse und Planung der Osteotomie basierten auf der End-Point-First-Methode. Zur radiologischen Auswertung wurden präoperative LAiS, intraoperative Achskontrollen mittels Planfeldmethode und postoperative LAiS zum Zeitpunkt der Abschlussuntersuchung verglichen und ausgewertet. Zusätzlich wurde das klinische Outcome mit dem SF-36 Fragebogen, dem Lysholm-Score und der VAS erfasst.

Bei der Präzision zeigte die oHTO-Gruppe eine höhere Rate an Patienten im definierten Zielbereich von  $\pm 3^\circ$  (HKA) und  $\pm 10\%$  (mechanische Beinachse) als die cDFO-Gruppe (HKA: oHTO 82%; cDFO 64%; mechanische Beinachse: oHTO 76%; cDFO: 36%). Die absolute Abweichung war dagegen fast identisch (HKA: oHTO 2,2°; cDFO 2,6°; mechanische Beinachse: oHTO 10,1%; cDFO 10,8%). Eine Überkorrektur fand ähnlich gehäuft (oHTO 12%; cDFO 18%) und eine Unterkorrektur häufiger in der cDFO-Gruppe statt (oHTO 12%, cDFO 46%). Wenig Komplikationen wurden bei diesen Osteotomieverfahren beobachtet und insgesamt konnten beide Gruppen überwiegend gute bis sehr gute klinische Ergebnisse (80-100 Punkte; oHTO: Lysholm-Score 86%, SF-36 65%; cDFO: Lysholm-Score 82%, SF-36 73%) im mittleren Verlauf verglichen zu den präoperativen Werten erzielen. In der oHTO war das klinische Ergebnis besser, je präziser die Achskorrektur war. Zusätzlich konnte ein Abfall der Lebensqualität und des funktionellen Outcomes bei den überkorrigierten MPTW bzw. LDFW beobachtet werden.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine relevante Anzahl der Varusdeformitäten femoral bedingt sind und die cDFO vergleichbare radiologische sowie klinische Ergebnisse wie die oHTO liefert. Beide valgisierenden kniegelenksnahen Umstellungsosteotomien ermöglichen bei entsprechender Indikation und Patientenselektion eine Verbesserung der klinischen Funktion, des Schmerzniveaus und der Lebensqualität. Damit stellen diese gelenkerhaltenden Eingriffe eine mögliche Alternative zur frühzeitigen Versorgung mit einer Kniegelenksprothese gerade bei jüngeren Patienten dar.

## 6 Literaturverzeichnis

1. Antony B, Jones G, Jin X, Ding C. Do early life factors affect the development of knee osteoarthritis in later life: a narrative review. *Arthritis Res Ther* [Internet]. Dezember 2016 [zitiert 30. August 2018];18(1). Verfügbar unter: <http://arthritis-research.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13075-016-1104-0>
2. Suri P, Morgenroth DC, Hunter DJ. Epidemiology of osteoarthritis and associated comorbidities. *PM R*. Mai 2012;4(5 Suppl):S10-19.
3. Bayliss LE, Culliford D, Monk AP, Glyn-Jones S, Prieto-Alhambra D, Judge A, u. a. The effect of patient age at intervention on risk of implant revision after total replacement of the hip or knee: a population-based cohort study. *The Lancet*. April 2017;389(10077):1424–30.
4. Takahashi S, Saito T. Decrease of Osteosclerosis in Subchondral Bone of Medial Compartmental Osteoarthritic Knee Seven to Nineteen Years after High Tibial Valgus Osteotomy. 61:5.
5. Odenbring S, Egund N, Lindstrand A, Lohmander LS, Willén H. Cartilage regeneration after proximal tibial osteotomy for medial gonarthrosis. An arthroscopic, roentgenographic, and histologic study. *Clin Orthop*. April 1992;(277):210–6.
6. Sharma L, Chmiel JS, Almagor O, Felson D, Guermazi A, Roemer F, u. a. The Role of Varus and Valgus Alignment in the Initial Development of Knee Cartilage Damage by MRI: the MOST Study. *Ann Rheum Dis* [Internet]. Februar 2013 [zitiert 26. August 2016];72(2). Verfügbar unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3845483/>
7. Sharma L, Song J, Dunlop D, Felson D, Lewis CE, Segal N, u. a. Varus and Valgus Alignment and Incident and Progressive Knee Osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*. November 2010;69(11):1940–5.
8. Hayashi D, Englund M, Roemer FW, Niu J, Sharma L, Felson DT, u. a. Knee Malalignment is Associated with an Increased Risk for Incident and Enlarging Bone Marrow Lesions in the More Loaded Compartments: The MOST Study. *Osteoarthr Cartil OARS Osteoarthr Res Soc*. November

- 2012;20(11):1227–33.
9. Waldstein W, Kolbitsch P, Koller U, Boettner F, Windhager R. Sport and physical activity following unicompartmental knee arthroplasty: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* März 2017;25(3):717–28.
  10. Bonnin MP, Laurent J-R, Zadegan F, Badet R, Pooler Archbold HA, Servien E. Can patients really participate in sport after high tibial osteotomy? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* Januar 2013;21(1):64–73.
  11. Ekhtiari S, Haldane CE, de SA D, Simunovic N, Musahl V, Ayeni OR. Return to Work and Sport Following High Tibial Osteotomy: A Systematic Review. *J Bone Jt Surg.* September 2016;98(18):1568–77.
  12. Saragaglia D, Mercier N, Colle P-E. Computer-assisted osteotomies for genu varum deformity: which osteotomy for which varus? *Int Orthop.* Februar 2010;34(2):185–90.
  13. Hofmann S, Lobenhoffer P, Staubli A, Van Heerwaarden R. Osteotomien am Kniegelenk bei Monokompartmentarthrose. *Orthop.* August 2009;38(8):755–70.
  14. Drenckhahn D, Waschke J. Benninghoff Taschenbuch Anatomie. 2. Aufl. München: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 2014. 592 S.
  15. Aust G, Aumüller G, Kirsch J, Conrad A, Engele J. Duale Reihe Anatomie. 3. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2014.
  16. Morra EA, Greenwald AS. Patellofemoral Replacement Polymer Stress During Daily Activities: A Finite Element Study. *J Bone Jt Surg.* 1. Dezember 2006;88(suppl 4):213–6.
  17. Kutzner I, Heinlein B, Graichen F, Bender A, Rohlmann A, Halder A, u. a. Loading of the knee joint during activities of daily living measured in vivo in five subjects. *J Biomech.* 10. August 2010;43(11):2164–73.
  18. Simpson KJ, Jameson EG, Odum S. Estimated Patellofemoral Compressive Forces and Contact Pressures during Dance Landings. *J*

- Appl Biomech. 1. Februar 1996;12(1):1–14.
19. Simpson KJ, Kanter L. Jump distance of dance landings influencing internal joint forces: I. Axial forces. Med Sci Sports Exerc. Juli 1997;29(7):916–27.
  20. Simpson KJ, Pettit M. Jump distance of dance landings influencing internal joint forces: II. Shear forces. Med Sci Sports Exerc. Juli 1997;29(7):928–36.
  21. Palastanga N, Soames R. Anatomie und menschliche Bewegung: Strukturen und Funktionen. München: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 2014. 616 S.
  22. Masouros SD, Bull AMJ, Amis AA. (i) Biomechanics of the knee joint. Orthop Trauma. 2010;24(2):84–91.
  23. Lobenhoffer P, Heerwaarden R van, Agneskirchner J. Kniegelenknahe Osteotomien: Indikation - Planung - Operationstechniken mit Plattenfixateuren. Georg Thieme Verlag; 2014. 291 S.
  24. Rödel R. Kniegelenknahe Beinachsfehlstellung. Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC) und des Berufsverbandes der Ärzte für Orthopädie (BVO) [Internet]. 2009 [zitiert 26. August 2016]. Verfügbar unter: [http://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/033-005\\_S1\\_Kniegelenknahe\\_Beinachsfehlstellung\\_2009\\_abgelaufen.pdf](http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/033-005_S1_Kniegelenknahe_Beinachsfehlstellung_2009_abgelaufen.pdf)
  25. Thaller PH, Fürmetz J, Chen F, Degen N, Manz KM, Wolf F. O-Beine und intensives Fußballtraining im Wachstumsalter. Dtsch Ärztebl. 2018;8.
  26. Shohat N, Machluf Y, Farkash R, Mha ASF, Chaiter Y. Clinical Knee Alignment among Adolescents and Association with Body Mass Index: A Large Prevalence Study. :5.
  27. Niethard FU. Kinderorthopädie. 2. Aufl. Stuttgart; New York, NY: Thieme; 2009. 520 S.
  28. Schneider S, Dewitz H, Klein P, Schäferhoff P. Stellt die valgisierende hohe Tibiaosteotomie eine mögliche Therapiemethode bei



- Leistungssportlern dar? Dtsch Z Für Sportmed. 1. März 2015;2015(03):71–7.
29. Chao EY, Neluhani EV, Hsu RW, Paley D. Biomechanics of malalignment. Orthop Clin North Am. Juli 1994;25(3):379–86.
30. Paley D. Normal lower limb alignment and joint orientation. In: Principles of deformity correction [Internet]. Springer; 2002 [zitiert 21. August 2016]. S. 1–18. Verfügbar unter: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59373-4\\_1](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59373-4_1)
31. Paley D, Pfeil J. Prinzipien der kniegelenknahen Deformitätenkorrektur. Orthop. 2000;29(1):18–38.
32. Moreland JR, Bassett LW, Hanker GJ. Radiographic analysis of the axial alignment of the lower extremity. J Bone Jt Surg Am. 1. Juni 1987;69(5):745–9.
33. Cooke TD, Pichora D, Siu D, Scudamore RA, Bryant JT. Surgical implications of varus deformity of the knee with obliquity of joint surfaces. Bone Jt J. 1. August 1989;71-B(4):560–5.
34. Paley D, Herzenberg JE. Principles of Deformity Correction. 1st Corrected ed. 2002. Corr. 3rd printing 2005. Berlin ; New York: Springer; 2005. 806 S.
35. Halder A, Kutzner I, Graichen F, Heinlein B, Beier A, Bergmann G. Influence of Limb Alignment on Mediolateral Loading in Total Knee Replacement: In Vivo Measurements in Five Patients. J Bone Jt Surg Am [Internet]. 6. Juni 2012 [zitiert 29. August 2016];94(11). Verfügbar unter: <http://jbjs.org/cgi/doi/10.2106/JBJS.K.00927>
36. Hsu RW, Himeno S, Coventry MB, Chao EY. Normal axial alignment of the lower extremity and load-bearing distribution at the knee. Clin Orthop. Juni 1990;(255):215–27.
37. Agneskirchner JD, Hurschler C, Wrann CD, Lobenhoffer P. The Effects of Valgus Medial Opening Wedge High Tibial Osteotomy on Articular Cartilage Pressure of the Knee: A Biomechanical Study. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg. August 2007;23(8):852–61.

38. Cicuttini F. Longitudinal study of the relationship between knee angle and tibiofemoral cartilage volume in subjects with knee osteoarthritis. *Rheumatology*. 17. November 2003;43(3):321–4.
39. Debrunner AM. Orthopädie /Orthopädische Chirurgie. Patientenorientierte Diagnostik und Therapie des Bewegungsapparates. 4., vollst. neu bearb. Aufl. 2005. Bern: Huber, Bern; 2005.
40. Cerejo R, Dunlop DD, Cahue S, Channin D, Song J, Sharma L. The influence of alignment on risk of knee osteoarthritis progression according to baseline stage of disease. *Arthritis Rheum*. Oktober 2002;46(10):2632–6.
41. Brouwer GM, Tol AWW, Bergink AP, Belo JN, Bernsen RMD, Reijman M, u. a. Association between valgus and varus alignment and the development and progression of radiographic osteoarthritis of the knee. *Arthritis Rheum*. April 2007;56(4):1204–11.
42. Hunter DJ, Niu J, Felson DT, Harvey WF, Gross KD, McCree P, u. a. Knee alignment does not predict incident osteoarthritis: The Framingham osteoarthritis study. *Arthritis Rheum*. April 2007;56(4):1212–8.
43. Sharma L, Song J, Felson DT, Cahue S, Shamiyeh E, Dunlop DD. The role of knee alignment in disease progression and functional decline in knee osteoarthritis. *JAMA*. 11. Juli 2001;286(2):188–95.
44. Ringdahl E, Pandit S. Treatment of knee osteoarthritis. *Am Fam Physician*. 1. Juni 2011;83(11):1287–92.
45. Hannan MT, Felson DT, Pincus T. Analysis of the discordance between radiographic changes and knee pain in osteoarthritis of the knee. *J Rheumatol*. Juni 2000;27(6):1513–7.
46. Ogden S, Mukherjee DP, Keating ME, Ogden AL, Albright JA, McCall RE. Changes in Load Distribution in the Knee After Opening-Wedge or Closing-Wedge High Tibial Osteotomy. *J Arthroplasty*. Januar 2009;24(1):101–9.
47. Hernigou P, Medevielle D, Debeyre J, Goutallier D. Proximal tibial osteotomy for osteoarthritis with varus deformity. A ten to thirteen-year

- follow-up study. *J Bone Joint Surg Am.* März 1987;69(3):332–54.
48. Staubli AE, Simoni CD, Babst R, Lobenhoffer P. TomoFix: a new LCP-concept for open wedge osteotomy of the medial proximal tibia – early results in 92 cases. *Injury.* November 2003;34:55–62.
49. Frey P, Miehke W, Munzinger U, Huber M, Bizzini M. Long-term results after high tibial osteotomy for the treatment of varus gonarthrosis. a retrospective 10 to 15 years follow-up study. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* 2003;19(6):76–77.
50. Polat G, Balci Hİ, Çakmak MF, Demirel M, Şen C, Aşık M. Long-term results and comparison of the three different high tibial osteotomy and fixation techniques in medial compartment arthrosis. *J Orthop Surg* [Internet]. Dezember 2017 [zitiert 13. Januar 2018];12(1). Verfügbar unter: <http://josr-online.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13018-017-0547-6>
51. Griffiths DL, Brockbank W. Orthopaedic Surgery in the Sixteenth and Seventeenth Centuries Traction Apparatus—the Vidian Pictures. *Bone Jt J.* 1. Mai 1949;31-B(2):313–7.
52. Pennington TH. Osteotomy as an indicator of antiseptic surgical practice. *Med Hist.* April 1994;38(2):178–88.
53. Jackson JP, Waugh W. Tibial Osteotomy for Osteoarthritis of the Knee. *Proc R Soc Med.* Oktober 1960;53(10):888.
54. Brittain HA. Treatment of genu valgum; the discarded iron. *Br Med J.* August 1948;2(4572):385–7.
55. Wardle EN. Osteotomy of the Tibia and Fibula in the Treatment of Chronic Osteoarthritis of the Knee. *Postgrad Med J.* September 1964;40(467):536–42.
56. Coventry MB. Osteotomy of the upper portion of the tibia for degenerative arthritis of the knee. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Am.* Juli 1965;47:984–90.
57. Coventry MB. Stepped Staple for Upper Tibial Osteotomy. *J Bone Jt Surg Am.* 1. Juli 1969;51(5):1011–1011.

58. Healy WL, Anglen JO, Wasilewski SA, Krackow KA. Distal femoral varus osteotomy. *J Bone Jt Surg Am.* 1988;70(1):102–109.
59. W M, L J. Experiences with 75 high tibial osteotomies. *Reconstr Surg Traumatol.* 1971 1970;12(0):53–63.
60. Povacz F. *Geschichte der Unfallchirurgie.* 2., unveränd. Aufl. Heidelberg: Springer; 2007. 438 S.
61. Harris WR, Kostuik JP. High tibial osteotomy for osteo-arthritis of the knee. *J Bone Joint Surg Am.* März 1970;52(2):330–6.
62. Fujisawa Y, Masuhara K, Shiomi S. The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. An arthroscopic study of 54 knee joints. *Orthop Clin North Am.* Juli 1979;10(3):585–608.
63. Coventry MB. Upper tibial osteotomy for osteoarthritis. *J Bone Joint Surg Am.* 67(7):1136–40.
64. Miniaci AMD, Ballmer FTMD, Ballmer PMMD, Jakob RPMD. Proximal Tibial Osteotomy: A New Fixation Device. *Clin Orthop.* September 1989;246:250–9.
65. Dugdale TWMD, Noyes FRMD, Styer DPD. Preoperative Planning for High Tibial Osteotomy: The Effect of Lateral Tibiofemoral Separation and Tibiofemoral Length. *Clin Orthop.* Januar 1992;274:248–64.
66. Schröter S, Ihle C, Mueller J, Lobenhoffer P, Stöckle U, van Heerwaarden R. Digital planning of high tibial osteotomy. Interrater reliability by using two different software. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* Januar 2013;21(1):189–96.
67. Paley D, Herzenberg JE, Tetsworth K, McKie J, Bhave A. Deformity planning for frontal and sagittal plane corrective osteotomies. *Orthop Clin North Am.* Juli 1994;25(3):425–65.
68. Zaki SH, Rae PJ. High tibial valgus osteotomy using the Tomofix plate--medium-term results in young patients. *Acta Orthop Belg.* Juni 2009;75(3):360–7.
69. Martinek V, Imhoff AB. Tibiale Umstellungsosteotomie am Kniegelenk-

- Renaissance eines klassischen Verfahrens. Dtsch Z Für Sportmed [Internet]. 2003 [zitiert 7. September 2016];54(6). Verfügbar unter: [http://www.zeitschrift-sportmedizin.de/fileadmin/content/archiv2003/heft06/Martinek\\_2.pdf](http://www.zeitschrift-sportmedizin.de/fileadmin/content/archiv2003/heft06/Martinek_2.pdf)
70. Pape D, Seil R, Adam F, Rupp S, Kohn D, Lobenhoffer P. Bildgebung und präoperative Planung der Tibiakopfosteotomie. Orthopäde. 1. Februar 2004;33(2):122–34.
71. van der Woude JAD, Spruijt S, van Ginneken BTJ, van Heerwaarden RJ. Distal femoral valgus osteotomy: bone healing time in single plane and biplanar technique. Strateg Trauma Limb Reconstr. November 2016;11(3):177–86.
72. Noyes FR, Barber SD, Simon R. High tibial osteotomy and ligament reconstruction in varus angulated, anterior cruciate ligament-deficient knees: A two- to seven-year follow-up study. Am J Sports Med. Januar 1993;21(1):2–12.
73. Hinterwimmer S, Feucht MJ, Imhoff AB. Hohe tibiale Osteotomie bei Varusgonarthrose: Indikation, Technik, Ergebnisse. Arthroskopie. August 2012;25(3):184–94.
74. Müller M, Strecker W. Arthroscopy prior to osteotomy around the knee? Arch Orthop Trauma Surg. November 2008;128(11):1217–21.
75. Maquet P. Valgus osteotomy for osteoarthritis of the knee. Clin Orthop. Oktober 1976;(120):143–8.
76. Weigel B, Nerlich ML. Praxisbuch Unfallchirurgie. Springer-Verlag; 2011. 1239 S.
77. Hankemeier S, Paley D, Pape HC, Zeichen J, Gosling T, Krettek C. Die kniegelenknahe Focal-dome-Osteotomie. Orthopäde. 1. Februar 2004;33(2):170–7.
78. Atrey A, Morison Z, Tosounidis T, Tunggal J, Waddell JP. Complications of closing wedge high tibial osteotomies for unicompartmental osteoarthritis of the knee. Bone Jt Res. 1. September 2012;1(9):205–9.

79. Amendola A, Bonasia DE. Results of high tibial osteotomy: review of the literature. *Int Orthop*. Februar 2010;34(2):155–60.
80. Friedmann S, Agneskirchner JD, Lobenhoffer P. Extendierende und flektierende Tibiakopfosteotomien. *Arthroskopie*. Januar 2008;21(1):30–8.
81. Cantin O, Magnussen RA, Corbi F, Servien E, Neyret P, Lustig S. The role of high tibial osteotomy in the treatment of knee laxity: a comprehensive review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. Oktober 2015;23(10):3026–37.
82. Aryee S, Imhoff AB, Rose T, Tischer T. Do we need synthetic osteotomy augmentation materials for opening-wedge high tibial osteotomy. *Biomaterials*. September 2008;29(26):3497–502.
83. Meidinger G, Imhoff AB, Paul J, Kirchhoff C, Sauerschnig M, Hinterwimmer S. May smokers and overweight patients be treated with a medial open-wedge HTO? Risk factors for non-union. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. März 2011;19(3):333–9.
84. Kim KJ, Song EK, Seon JK, Seol JH. Biomechanical Study of the Fixation Plates For Opening Wedge High Tibial Osteotomy. *Knee Surg Relat Res*. 30. September 2015;27(3):181–6.
85. Singer MS, Meselhy MA, Essawy OM. Proximal tibia medial Opening-wedge osteotomy using Puddu plate for treatment of medial compartment osteoarthritis with varus knee deformity in adolescent and young adult.
86. Sommer C, Gautier E, Müller M, Helfet DL, Wagner M. First clinical results of the Locking Compression Plate (LCP). *Injury*. November 2003;34:43–54.
87. Staubli AE, Jacob HAC. Evolution of open-wedge high-tibial osteotomy: experience with a special angular stable device for internal fixation without interposition material. *Int Orthop*. Februar 2010;34(2):167–72.
88. Babis GCM, An K-NP, Chao EYSP, Rand JA, Sim FH. DOUBLE LEVEL OSTEOTOMY OF THE KNEE: A METHOD TO RETAIN JOINT-LINE OBLIQUITY: CLINICAL RESULTS. *J Bone*. August 2002;1380–8.

89. Bagherifard A, Jabalameli M, Hadi HA, Rahbar M, Mokhtari T, Yahyazadeh H, u. a. The results of biplanar distal femoral osteotomy; a case series study. Arch Bone Jt Surg. 2015;3(1):35.
90. Brinkman J-M, Freiling D, Lobenhoffer P, Staubli AE, van Heerwaarden RJ. [Supracondylar femur osteotomies around the knee. Patient selection, planning, operative techniques, stability of fixation, and bone healing]. Orthop. November 2014;43(11):988–99.
91. Van Heerwaarden RJ. Die suprakondyläre varisierende und valgisierende Femurosteotomie mit Plattenfixateur. In: Kniegelenknahe Osteotomien [Internet]. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Thieme Verlag; 2014 [zitiert 14. Januar 2018]. Verfügbar unter: <https://www.thieme-connect.de/products/ebooks/html/10.1055/b-0034-94168>
92. WHO:: Global Database on Body Mass Index [Internet]. [zitiert 6. Dezember 2017]. Verfügbar unter: [http://apps.who.int/bmi/index.jsp?introPage=intro\\_3.html](http://apps.who.int/bmi/index.jsp?introPage=intro_3.html)
93. Cooke D, Scudamore A, Li J, Wyss U, Bryant T, Costigan P. Axial lower-limb alignment: comparison of knee geometry in normal volunteers and osteoarthritis patients. Osteoarthritis Cartilage. 1. Januar 1997;5(1):39–47.
94. Steindler A. Kinesiology of the human body under normal and pathological conditions. Springfield, Ill: Thomas; 1955. 708 S.
95. Brown GA, Amendola A. Radiographic Evaluation and Preoperative Planning for High Tibial Osteotomies. Oper Tech Sports Med. 1. März 2012;20(1):93–102.
96. Pietsch M, Hofmann S. Wertigkeit der radiologischen Bildgebung beim Kniegelenk für den Orthopäden. Radiol. Januar 2006;46(1):55–64.
97. Oswald MH, Jakob RP, Schneider E, Hoogewoud H-M. Radiological analysis of normal axial alignment of femur and tibia in view of total knee arthroplasty. J Arthroplasty. 1993;8(4):419–426.
98. Agneskirchner JD, Hurschler C, Stukenborg-Colsman C, Imhoff AB, Lobenhoffer P. Effect of high tibial flexion osteotomy on cartilage pressure

- and joint kinematics: a biomechanical study in human cadaveric knees: Winner of the AGA-DonJoy Award 2004. Arch Orthop Trauma Surg. November 2004;124(9):575–84.
99. TomoFix (MHT) mediale Tibia [Internet]. [zitiert 12. Juli 2016]. Verfügbar unter:  
[http://synthes.vo.llnwd.net/o16/LLNWMB8/INT%20Mobile/Synthes%20International/Product%20Support%20Material/legacy\\_Synthes\\_PDF/016.000.386.pdf](http://synthes.vo.llnwd.net/o16/LLNWMB8/INT%20Mobile/Synthes%20International/Product%20Support%20Material/legacy_Synthes_PDF/016.000.386.pdf)
100. Saleh M, Harriman P, Edwards DJ. A radiological method for producing precise limb alignment. J Bone Joint Surg Br. Mai 1991;73(3):515–6.
101. Outerbridge RE. THE ETIOLOGY OF CHONDROMALACIA PATELLAE. J Bone Amp Jt Surg Br Vol. 1. November 1961;43-B(4):752.
102. Woodacre T, Ricketts M, Evans JT, Pavlou G, Schranz P, Hockings M, u. a. Complications associated with opening wedge high tibial osteotomy — A review of the literature and of 15years of experience. The Knee. März 2016;23(2):276–82.
103. Insall J, Salvati E. Patella position in the normal knee joint. Radiology. Oktober 1971;101(1):101–4.
104. Caton J, Deschamps G, Chambat P, Lerat JL, Dejour H. [Patella infera. Apropos of 128 cases]. Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot. 1982;68(5):317–25.
105. Blackburne JS, Peel TE. A new method of measuring patellar height. J Bone Joint Surg Br. Mai 1977;59(2):241–2.
106. Ware JE, Sherbourne CD. The MOS 36-Item Short-Form Health Survey (SF-36): I. Conceptual Framework and Item Selection. Med Care. 1992;30(6):473–83.
107. Lysholm J, Gillquist J. Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. Am J Sports Med. 1982;10(3):150–154.
108. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament



- injuries. Clin Orthop. September 1985;(198):43–9.
109. Carlsson AM. Assessment of chronic pain. I. Aspects of the reliability and validity of the visual analogue scale. Pain. 1983;16(1):87–101.
110. Terauchi M, Shirakura K, Katayama M, Higuchi H, Takagishi K, Kimura M. Varus inclination of the distal femur and high tibial osteotomy. Bone Jt J. 2002;84(2):223–226.
111. van Raaij TM, Takacs I, Reijman M, Verhaar JAN. Varus inclination of the proximal tibia or the distal femur does not influence high tibial osteotomy outcome. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. April 2009;17(4):390–5.
112. Ivarsson I, Myrnerets R, Gillquist J. High tibial osteotomy for medial osteoarthritis of the knee. A 5 to 7 and 11 year follow-up. Bone Jt J. 1990;72(2):238–244.
113. Hankemeier S, Mommsen P, Krettek C, Jagodzinski M, Brand J, Meyer C, u. a. Accuracy of high tibial osteotomy: comparison between open- and closed-wedge technique. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. Oktober 2010;18(10):1328–33.
114. Brouwer RW, Bierma-Zeinstra SMA, Van Raaij TM, Verhaar JAN. Osteotomy for medial compartment arthritis of the knee using a closing wedge or an opening wedge controlled by a Puddu plate. Bone Jt J. 2006;88(11):1454–1459.
115. Iorio R, Pagnottelli M, Vadalà A, Giannetti S, Di Sette P, Papandrea P, u. a. Open-wedge high tibial osteotomy: comparison between manual and computer-assisted techniques. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. Januar 2013;21(1):113–9.
116. Duivenvoorden T, Brouwer RW, Baan A, Bos PK, Reijman M, Bierma-Zeinstra SMA, u. a. Comparison of Closing-Wedge and Opening-Wedge High Tibial Osteotomy for Medial Compartment Osteoarthritis of the Knee: A Randomized Controlled Trial with a Six-Year Follow-up. J Bone Jt Surg. 3. September 2014;96(17):1425–32.
117. Spahn G. Complications in high tibial (medial opening wedge) osteotomy. Arch Orthop Trauma Surg. Dezember 2004;124(10):649–53.

118. Schröter S, Ihle C, Elson DW, Döbele S, Stöckle U, Ateschrang A. Surgical accuracy in high tibial osteotomy: coronal equivalence of computer navigation and gap measurement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* November 2016;24(11):3410–7.
119. Saragaglia D, Roberts J. Navigated osteotomies around the knee in 170 patients with osteoarthritis secondary to genu varum. *Orthopedics.* Oktober 2005;28(10 Suppl):s1269-1274.
120. Stanley JC, Robinson KG, Devitt BM, Richmond AK, Webster KE, Whitehead TS, u. a. Computer assisted alignment of opening wedge high tibial osteotomy provides limited improvement of radiographic outcomes compared to flouroscopic alignment. *The Knee.* März 2016;23(2):289–94.
121. Lee D-H, Han S-B, Oh K-J, Lee JS, Kwon J-H, Kim J-I, u. a. The weight-bearing scanogram technique provides better coronal limb alignment than the navigation technique in open high tibial osteotomy. *The Knee.* März 2014;21(2):451–5.
122. Lee D-H, Park S-C, Park H-J, Han S-B. Effect of soft tissue laxity of the knee joint on limb alignment correction in open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* Dezember 2016;24(12):3704–12.
123. Brosset T, Pasquier G, Migaud H, Gougeon F. Opening wedge high tibial osteotomy performed without filling the defect but with locking plate fixation (TomoFix™) and early weight-bearing: Prospective evaluation of bone union, precision and maintenance of correction in 51 cases. *Orthop Traumatol Surg Res.* November 2011;97(7):705–11.
124. Vena G, D'Adamio S, Amendola A. Complications of osteotomies about the knee. *Sports Med Arthrosc Rev.* Juni 2013;21(2):113–20.
125. Schröter S, Ateschrang A, Ihle C, Stöckle U, Konstantinidis L, Döbele S. Die Fraktur der Gegenkortikalis bei der aufklappenden Osteotomie des Tibiakopfes. *Orthop.* November 2014;43(11):1000–7.
126. Gaasbeek RDA, Nicolaas L, Rijnberg WJ, van Loon CJM, van Kampen A. Correction accuracy and collateral laxity in open versus closed wedge high

- tibial osteotomy. A one-year randomised controlled study. *Int Orthop*. Februar 2010;34(2):201–7.
127. Sim JA, Kwak JH, Yang SH, Choi ES, Lee BK. Effect of weight-bearing on the alignment after open wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. Juli 2010;18(7):874–8.
128. Sabharwal S, Zhao C. Assessment of lower limb alignment: supine fluoroscopy compared with a standing full-length radiograph. *J Bone Joint Surg Am*. Januar 2008;90(1):43–51.
129. Swanson KE, Stocks GW, Warren PD, Hazel MR, Janssen HF. Does axial limb rotation affect the alignment measurements in deformed limbs? *Clin Orthop*. Februar 2000;(371):246–52.
130. Krackow KA, Pepe CL, Galloway EJ. A mathematical analysis of the effect of flexion and rotation on apparent varus/valgus alignment at the knee. *Orthopedics*. August 1990;13(8):861–8.
131. Brouwer RW, Jakma TSC, Brouwer KH, Verhaar J a. N. Pitfalls in determining knee alignment: a radiographic cadaver study. *J Knee Surg*. Juli 2007;20(3):210–5.
132. Kannan A, Hawdon G, McMahon SJ. Effect of flexion and rotation on measures of coronal alignment after TKA. *J Knee Surg*. November 2012;25(5):407–10.
133. Lee YS, Kim MG, Byun HW, Kim SB, Kim JG. Reliability of the imaging software in the preoperative planning of the open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. März 2015;23(3):846–51.
134. Liidakis E, Kenaway M, Liadaki E, Mommsen P, Krettek C, Hankemeier S. The axis-board: An alternative to the cable technique for intraoperative assessment of lower limb alignment. *Technol Health Care*. 1. Januar 2010;18(3):165–71.
135. Jang K-M, Lee J-H, Cho IY, Park B-K, Han S-B. Intraoperative Fluoroscopic Assessment of Limb Alignment is a Reliable Predictor for Postoperative Limb Alignment in Biplanar Medial Opening-Wedge High

- Tibial Osteotomy. J Arthroplasty. März 2017;32(3):756–60.
136. Hawi N, Yarboro S, Suero EM, Liodakis E, Meller R, Krettek C, u. a. Laser method for intraoperative evaluation of lower extremity alignment: comparison of a novel technique to CT and a conventional method. Arch Orthop Trauma Surg. Mai 2014;134(5):645–50.
137. Yoon S-D, Zhang G, Kim H-J, Lee B-J, Kyung H-S. Comparison of Cable Method and Miniaci Method Using Picture Archiving and Communication System in Preoperative Planning for Open Wedge High Tibial Osteotomy. Knee Surg Relat Res. 1. Dezember 2016;28(4):283–8.
138. Reising K, Strohm PC, Hauschild O, Schmal H, Khattab M, Südkamp NP, u. a. Computer-assisted navigation for the intraoperative assessment of lower limb alignment in high tibial osteotomy can avoid outliers compared with the conventional technique. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. Januar 2013;21(1):181–8.
139. Das D. Distal femoral opening-wedge osteotomy for lateral compartment osteoarthritis of the knee. Open Access Surg. November 2008;25.
140. Thein R, Haviv B, Bronak S, Thein R. Distal femoral osteotomy for valgus arthritic knees. J Orthop Sci. November 2012;17(6):745–9.
141. Forkel P, Achtnich A, Metzlaß S, Zantop T, Petersen W. Midterm results following medial closed wedge distal femoral osteotomy stabilized with a locking internal fixation device. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. Juli 2015;23(7):2061–7.
142. Asik M, Sen C, Kilic B, Goksan SB, Ciftci F, Taser OF. High tibial osteotomy with Puddu plate for the treatment of varus gonarthrosis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 29. September 2006;14(10):948–54.
143. Niemeyer P, Schmal H, Hauschild O, von Heyden J, Südkamp NP, Köstler W. Open-Wedge Osteotomy Using an Internal Plate Fixator in Patients With Medial-Compartment Gonarthrosis and Varus Malalignment: 3-Year Results With Regard to Preoperative Arthroscopic and Radiographic Findings. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg. Dezember 2010;26(12):1607–16.

144. Schröter S, Gonser CE, Konstantinidis L, Helwig P, Albrecht D. High Complication Rate After Biplanar Open Wedge High Tibial Osteotomy Stabilized With a New Spacer Plate (Position HTO Plate) Without Bone Substitute. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* Mai 2011;27(5):644–52.
145. El-Azab H, Glabgly P, Paul J, Imhoff AB, Hinterwimmer S. Patellar Height and Posterior Tibial Slope After Open- and Closed-Wedge High Tibial Osteotomy A Radiological Study on 100 Patients. *Am J Sports Med.* 2. Januar 2010;38(2):323–9.
146. LaPrade RF, Barrera Oro F, Ziegler CG, Wijdicks CA, Walsh MP. Patellar Height and Tibial Slope after Opening-Wedge Proximal Tibial Osteotomy: A Prospective Study. *Am J Sports Med.* Januar 2010;38(1):160–70.
147. DRAGOSLOVEANU S, CRISTEA S, DRAGOSLOVEANU C. The effect of high tibial osteotomy on the posterior tibial slope. *Maedica.* 2014;9(2):173.
148. Schröter S, Lobenhoffer P, Mueller J, Ihle C, Stöckle U, Albrecht D. Veränderung der Patellahöhe nach „open“- und „closed wedge high tibial osteotomy“: Review der Literatur. *Orthop.* März 2012;41(3):186–94.
149. Okamoto R, Koshino T, Morii T. Shortening of patellar ligament and patella baja with improvement of quadriceps muscle strength after high tibial osteotomy. *Bull Hosp Jt Dis N Y N.* 1993;53(3):21–4.
150. Gokay NS, Erginer R, Dervisoglu S, Yalcin MB, Gokce A. Patella infera or patellar tendon adherence after high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* Juli 2014;22(7):1591–8.
151. Nha K-W, Kim H-J, Ahn H-S, Lee D-H. Change in Posterior Tibial Slope After Open-Wedge and Closed-Wedge High Tibial Osteotomy A Meta-analysis. *Am J Sports Med.* 12. Februar 2016;0363546515626172.
152. Chae DJ, Shetty GM, Lee DB, Choi HW, Han SB, Nha KW. Tibial slope and patellar height after opening wedge high tibia osteotomy using autologous tricortical iliac bone graft. *The Knee.* 1. März 2008;15(2):128–33.
153. Brandon ML, Haynes PT, Bonamo JR, Flynn MI, Barrett GR, Sherman MF. The Association Between Posterior-Inferior Tibial Slope and Anterior

- Cruciate Ligament Insufficiency. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg*. August 2006;22(8):894–9.
154. Jung KA, Lee SC, Hwang SH, Song MB. ACL injury while jumping rope in a patient with an unintended increase in the tibial slope after an opening wedge high tibial osteotomy. *Arch Orthop Trauma Surg*. August 2009;129(8):1077–80.
155. Kim J-H, Kim H-J, Lee D-H. Leg length change after opening wedge and closing wedge high tibial osteotomy: A meta-analysis. Nazarian A, Herausgeber. *PLOS ONE*. 13. Juli 2017;12(7):e0181328.
156. Kim JI, Kim BH, Lee KW, Lee O, Han HS, Lee S, u. a. Lower Limb Length Discrepancy After High Tibial Osteotomy: Prospective Randomized Controlled Trial of Lateral Closing Versus Medial Opening Wedge Osteotomy. *Am J Sports Med*. Dezember 2016;44(12):3095–102.
157. Morin V, Pailhé R, Duval BR, Mader R, Cognault J, Rouchy R-C, u. a. Gait analysis following medial opening-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. Juni 2018;26(6):1838–44.
158. Faschingbauer M, Nelitz M, Urlaub S, Reichel H, Dornacher D. Return to work and sporting activities after high tibial osteotomy. *Int Orthop*. August 2015;39(8):1527–34.
159. Bastard C, Mirouse G, Potage D, Silbert H, Roubineau F, Hernigou P, u. a. Return to sports and quality of life after high tibial osteotomy in patients under 60 years of age. *Orthop Traumatol Surg Res*. Dezember 2017;103(8):1189–91.
160. Webb M, Dewan V, Elson D. Functional results following high tibial osteotomy: a review of the literature. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. Mai 2018;28(4):555–63.
161. Ihle C, Ateschrang A, Grünwald L, Stöckle U, Saier T, Schröter S. Health-related quality of life and clinical outcomes following medial open wedge high tibial osteotomy: a prospective study. *BMC Musculoskelet Disord* [Internet]. Dezember 2016 [zitiert 20. August 2018];17(1). Verfügbar unter: <http://bmcmusculoskeletdisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/s128>

91-016-1076-x

162. Maffulli N, Loppini M, Longo UG, Denaro V, Oliva F. Bovine xenograft locking Puddu plate versus tricalcium phosphate spacer non-locking Puddu plate in opening-wedge high tibial osteotomy: a prospective double-cohort study. *Int Orthop*. Mai 2013;37(5):819–26.
163. Bode G, Ogon P, Pestka J, Zwingmann J, Feucht M, Südkamp N, u. a. Clinical outcome and return to work following single-stage combined autologous chondrocyte implantation and high tibial osteotomy. *Int Orthop*. April 2015;39(4):689–96.
164. Schuster P, Geßlein M, Schlumberger M, Mayer P, Mayr R, Oremek D, u. a. Ten-Year Results of Medial Open-Wedge High Tibial Osteotomy and Chondral Resurfacing in Severe Medial Osteoarthritis and Varus Malalignment. *Am J Sports Med*. Mai 2018;46(6):1362–70.
165. Holschen M, Lobenhoffer P. Komplikationen kniegelenknaher Umstellungsosteotomien. *Orthop*. Januar 2016;45(1):13–23.
166. Tuncay İ, Elmadag M, Bilsel K. Evaluation of mobile bearing unicompartmental knee arthroplasty, opening-wedge and dome-type high tibial osteotomies for knee arthritis. *ACTA Orthop Traumatol Turc* [Internet]. 2015 [zitiert 22. August 2018]; Verfügbar unter: <http://www.aott.org.tr/index.php/aott/article/view/3083/3881>
167. Krych AJ, Reardon P, Sousa P, Pareek A, Stuart M, Pagnano M. Unicompartmental Knee Arthroplasty Provides Higher Activity and Durability Than Valgus-Producing Proximal Tibial Osteotomy at 5 to 7 Years: *J Bone Jt Surg*. Januar 2017;99(2):113–22.
168. Ho J, Stitzlein R, Green C, Stoner T, Froimson M. Return to Sports Activity following UKA and TKA. *J Knee Surg*. 10. Juli 2015;29(03):254–9.
169. Walton N, Jahromi I, Lewis P, Dobson P, Angel K, Campbell D. Patient-Perceived Outcomes and Return to Sport and Work: TKA Versus Mini-Incision Unicompartmental Knee Arthroplasty. *J Knee Surg*. 25. Januar 2010;19(02):112–6.
170. Tilbury C, Schaasberg W, Plevier JW, Fiocco M, Vliet-Vlieland TP,

- Nelissen RG. SAT0320 Return to Work After Total Knee and Hip Arthroplasty: a Systematic Review. *Ann Rheum Dis*. Juni 2013;72(Suppl 3):A692.1-A692.
171. Bonnin M, Laurent JR, Parratte S, Zadegan F, Badet R, Bissery A. Can patients really do sport after TKA? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. Juli 2010;18(7):853–62.
172. Kuijer PPFM, Kievit AJ, Pahlplatz TMJ, Hooiveld T, Hoozemans MJM, Blankevoort L, u. a. Which patients do not return to work after total knee arthroplasty? *Rheumatol Int*. September 2016;36(9):1249–54.
173. van Wulfften Palthe AFY, Clement ND, Temmerman OPP, Burger BJ. Survival and functional outcome of high tibial osteotomy for medial knee osteoarthritis: a 10–20-year cohort study. *Eur J Orthop Surg Traumatol* [Internet]. 12. April 2018 [zitiert 22. August 2018]; Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/s00590-018-2199-6>
174. W-Dahl A, Robertsson O. Similar outcome for total knee arthroplasty after previous high tibial osteotomy and for total knee arthroplasty as the first measure. *Acta Orthop*. 3. Juli 2016;87(4):395–400.
175. van Raaij TM, Reijman M, Furlan AD, Verhaar JA. Total knee arthroplasty after high tibial osteotomy. A systematic review. *BMC Musculoskelet Disord* [Internet]. Dezember 2009 [zitiert 17. September 2018];10(1). Verfügbar unter: <http://bmcmusculoskeletdisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2474-10-88>



## 7 Anhang

### 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifikation der Achsabweichung [34] .....	4
Abbildung 2: Circulus vitiosus bei Genu varum [39] .....	5
Abbildung 3: Schematische Darstellung der chirurgischen Behandlungsoptionen .....	10
Abbildung 4: Beinachsen und Gelenkzentren [34].....	17
Abbildung 5: Physiologische Winkel in der Frontalebene (Abkürzung siehe Tabelle 2), modifiziert aus [34].....	18
Abbildung 6: Bestimmung des aPDFW und Tibial Slope, modifiziert aus [34] .....	19
Abbildung 7: Monofokale Achskorrektur.....	21
Abbildung 8: Bifokale Achskorrektur .....	22
Abbildung 9: Verwendete Implantate.....	25
Abbildung 10: Planfeld mit Referenzlinien .....	26
Abbildung 11: Planfeld intraoperativ .....	27
Abbildung 12: Mechanische Beinachse, modifiziert aus [13] .....	30
Abbildung 13: Patella-Indizes.....	31
Abbildung 14: Mittelwertveränderung des HKA .....	38
Abbildung 15: Genauigkeit der Beinachsenkorrektur .....	39
Abbildung 16: Veränderung des MPTW nach oHTO, Überkorrekturen wurden rot markiert .....	40
Abbildung 17: Veränderung des mLDFW nach cDFO, Überkorrekturen wurden rot markiert.....	41
Abbildung 18: Prä- und postoperative Lebensqualität nach SF-36 .....	45
Abbildung 19: Prä- und postoperatives Ergebnis des Lysholm-Scores .....	46
Abbildung 20: Prä- und postoperatives Ergebnis beim subjektiven Schmerzempfinden der VAS .....	47

### 7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakteristika des Patientenkollektivs .....	15
Tabelle 2: Physiologische Winkel in der Frontalebene [34].....	18
Tabelle 3: physiologische Winkel in der Sagittalebene [13,31] .....	19
Tabelle 4: Normwerte der Indizes für die Patellahöhe [103–105].....	31
Tabelle 5: Grad der Chondromalazie .....	34
Tabelle 6: Radiologische Ergebnisse cDFO-Gruppe.....	36
Tabelle 7: Radiologische Ergebnisse oHTO-Gruppe .....	37
Tabelle 8: Vergleich der klinischen Ergebnisse zwischen überkorrigierten und normwertigen Korrekturen.....	41

<b>Tabelle 9: Vergleich der prä- und postoperativen Patellahöhe.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabelle 10: Abweichungen der mechanischen Beinachse zwischen LAiS und Planfeld unter bestimmten Kriterien .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabelle 11: Vergleich der Präzision der Achskorrektur mit dem postoperativen klinischen Ergebnis.....</b>	<b>48</b>

### 7.3 Abkürzungsverzeichnis

a.-p.	anterior-posterior
aLDFW	anatomischer lateraler distaler Femurwinkel
aMPFW	anatomischer medialer proximaler Femurwinkel
AO-Stiftung	Arbeitsgemeinschaft Osteosynthese
aPDFW	anatomischer posteriorer distaler Femurwinkel
BMI	Body Mass Index
BPI	Blackburn-Peel-Index
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cDFO	laterale zuklappende (closed-wedge) suprakondyläre Femurosteotomie
CDI	Caton-Deschamps-Index
cHTO	laterale zuklappende (closed-wedge) hohe Tibiaosteotomie
CM	Chondromalazie
DFO	distale Femurosteotomie
Diff.	Differenz
CORA	Center of Rotation of Angulation
EPF-Methode	Endpoint-First Methode
et al.	et alii, und andere
HKA	hip-knee-ankle angle
HKZ	Hüftkopfszentrum
HTO	hohe tibiale Umstellungsosteotomie
ISI	Insall-Salvati-Index
KGZ	Kniegelenkszentrum
LAiS	Lange Aufnahme im Stehen

LCP	Locking Compression Plate
LISS	Less invasive stabilization system
JLCA	Joint Line Convergence Angle
LDTW	Lateraler distaler Tibiawinkel
MAD	Mechanical Axis Deviation
mLDFW	mechanischer lateraler distaler Femurwinkel
mLPFW	mechanischer lateraler proximaler Femurwinkel
MPTW	medialer proximaler Tibiawinkel
mTFW	mechanischer tibiofemorale Winkel (mTFW)
MUS	mediale unikondyläre Schlittenprothese
MW	Mittelwert
n	Anzahl
NCB	Non Contact Bridging plate
o.g.	oben genannten
oHTO	mediale aufklappende (open-wedge) hohe tibiale Umstellungsosteotomie
OSGZ	oberes Sprunggelenkszentrum
ROM	range of motion
SD	Standardabweichung
SF-36	Short-Form-36 Health Survey
sog.	sogenannten
TK	totale Knieendoprothese
VAS	Visual-Analog-Scale
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
WHO	World Health Organization
z.B.	zum Beispiel

## **8 Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich von ganzem Herzen bedanken bei:

Herrn PD Dr. med. Christian Prall für das ermöglichen dieser Promotionsarbeit unter Ihrer Leitung.

Herrn Dr. med. Julian Fürmetz für die Erarbeitung des Themas, die hervorragende persönliche Betreuung und die ständige Diskussions- und Hilfsbereitschaft. In gleicher Weise möchte ich mich neben der konstruktiven Korrektur mit wertvollen Anregungen auch für Ihre aufrichtige Unterstützung in beruflicher und persönlicher Hinsicht bedanken.

der gesamten Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie unter der Leitung von Dr. med. Peter Thaller für die freundschaftliche, hilfsbereite Arbeitsatmosphäre und die zahlreichen Ratschläge, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

meinen Freunden, die mich nicht nur tatkräftig unterstützten, sondern mich stets motivierten und für die erforderliche Abwechslung sorgten.

meinen Eltern und meiner Schwester mit ihrer wundervollen Familie für die uneingeschränkte, vielfältige und liebevolle Unterstützung bei meinem bisherigen Lebensweg, denen ich diese Arbeit widme.

## 9 Eidesstattliche Erklärung

Patzler, Sven

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema:

### **Valgisierende kniegelenksnahe Umstellungsosteotomie - radiologische und klinische Ergebnisse**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 12.03.2020  
Ort, Datum

Sven Patzler  
Doktorand